



TUGASAKHIR -TL141584

**PENGARUH VARIASI WAKTU TAHAN
SOLUTION TREATMENT DAN *AGING*
TERHADAP PERUBAHAN MIKRO STRUKTUR
SERTA KEKERASAN *COPPERIZED*-AISI 1006**

OLIVIA ROSALIA
NRP. 2712100021

Dosen Pembimbing:
Sutarsis, S.T., M.Sc.
Rindang Fajarin, S.Si, M.Si.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL & METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



FINAL PROJECT - TL141584

EFFECTS OF VARIATION HOLDING TIMES SOLUTION TREATMENT AND AGING TO ITS MICRO STRUCTURE AND HARDNESS OF COPPERIZED-AISI 1006

**OLIVIA ROSALIA
NRP. 2712100021**

**Advisor:
Sutarsis, S.T., M.Sc.
Rindang Fajarin, S.Si, M.Si.**

**MATERIALS & METALLURGICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016**

**PENGARUH VARIASI WAKTU TAHAN *SOLUTION*
TREATMENT DAN AGING TERHADAP
PERUBAHAN MIKRO STRUKTUR SERTA
KEKERASAN *COPPERIZED-AISI 1006***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

OLIVIA ROSALIA

NRP 2712100021

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Sutarsis, S.T., M.Sc. (Pembimbing 1)
2. Rindang Fajarin S. Si. (Pembimbing 2)



PENGARUH VARIASI WAKTU TAHAN *SOLUTION TREATMENT* DAN AGING TERHADAP PERUBAHAN MIKRO STRUKTUR SERTA KEKERASAN *COPPERIZED-AISI 1006*

Nama : Olivia Rosalia
NRP : 2712100021
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Sutarsis, S.T., M.Sc.
Dosen Co-Pembimbing : Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.

ABSTRAK

Keberadaan tembaga dalam baja merupakan alasan *precipitation hardening* dilakukan karena penambahan tembaga di dalam baja dapat berperan sebagai *grain refinement agent* dan *solid solution strengthening agent*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan tembaga dan pengaruh waktu tahan *solution treatment* serta waktu tahan *aging* terhadap perubahan struktur mikro, dan perubahan nilai kekerasan *copperized-AISI1006*. Preparasi spesimen dilakukan dengan memotong spesimen dimensi 3x30x90 mm dan membersihkan permukaan spesimen dari karat dan pengotor, tahap penelitian terdiri dari metode *copperizing* yaitu dengan memanaskan baja pada temperature *pre-heat* 900°C dan *copperized-AISI 1006* pada temperature sekitar 1083°C dengan *immerse time* yaitu 5 menit dilanjutkan pendinginan *normalizing* kemudian dilakukansolution *heat treatment* dengan variasi waktu tahan yaitu 30 dan 60 menit pada temperatur 900°C lalu di *quenching*. Setelah itu dilakukan *aging* dengan variasi waktu tahan yaitu 30,60 dan 90 menit pada temperatur 450°C dengan pendinginan *normalizing*. Tahap akhir adalah tahap identifikasi yang mana serangkaian pengujian spesimen dilakukan, adapun pengujian-pengujian tersebut antara lain: uji komposisi unsur menggunakan alat *Optical Emission*

Spectroscopy (OES), uji perubahan struktur mikro dengan menggunakan alat mikroskop optik, uji kekerasan dengan menggunakan alat uji kekerasan mikro vickers serta uji karakterisasi material menggunakan alat SEM/EDX dan XRD. Dari hasil pengamatan makro memperlihatkan adanya lapisan tembaga dan oksida di permukaan substrat, hasil pengujian struktur mikro terbentuk struktur dominan matriks α -ferit dengan fasa kedua berupa partikel Fe-Cu pada batas butir serta lamanya waktu tahan pada *solution treatment* dan waktu tahan *aging* menyebabkan naiknya luasan daerah batas butir. Hasil pengujian OES memperlihatkan kenaikan kadar tembaga dalam baja sebesar 0,0905% dan *mapping* tembaga menunjukkan bahwa *cluster* tembaga memiliki kecenderungan berkumpul di batas butir. Pengujian XRD menunjukkan adanya pergeseran puncak Fe yang mengindikasikan Cu masuk kedalam Fe dan terbentuk fasa baru yaitu $\text{Cu}_{0,003}\text{Fe}_{0,997}$. Sedangkan pengujian kekerasan memperlihatkan penurunan nilai kekerasan setelah dilakukan proses *aging*.

Kata kunci : AISI 1006 , *aging, copperized, precipitation hardening, solution treatment, waktu tahan*

EFFECTS OF VARIATION HOLDINGTIMES SOLUTION TREATMENT AND AGING TO ITS MICRO STRUCTURE AND HARDNESS OF COPPERIZED-AISI 1006

Name : Olivia Rosalia
NRP : 2712 100 021
Department : Materials and Metallurgical Engineering
FTI-ITS
Advisor : Sutarsis, S.T., M.Sc.
Co-Advisor : Rindang Fajarin , S.Si., M.Si.

ABSTRACT

The existence of copper in the steel was one of the reason why this precipitation hardening was performed. The addition of copper inside the steel has a role as grain refinement agent and solid solution hardening agent. This research aimed to analyse the effect of cooper addition and theeffect of holding time of solution treatment and holding time of aging in the copperizing process of AISI 1006 towards the transformation of microstructure, and the alteration of AISI 1006 hardness number. The preparation of specimen wasperformed by cutting the specimen into 3 x 30 x 90 mm and cleaning the surface of the specimen from rust and impurities. The step of this research consisted of copperizing method by pre heating the steel until 900° C and heating the copperized AISI 1006 until 1083° C with immerse time, 5 minutes which followed by cooling normalizing and then solution het treatment was performed with variation of holding time 30 minutes and 60 minutes at 900° C and followed by quenching. After that, aging was performed with holding time variation 30, 60 and 90 minutes at 450° C and followed by cooling normalizing. The final step was identification of specimens which performed by elemental composition test using Optical Emission Spectroscopy (OES), transformation of microstructure test using optical microscope, hardness test using micro Vickers and

material characterization using SEM/EDX and XRD. The result of macro observation showed that there were copper and oxide layer on the surface of the substrate and from microstructure examination showed there were formed the dominant structure was α -ferrite matrices with the second phases in the form of granular bainite which consisted of irregular ferrite and Fe-Cu particle in the grain boundary, also the duration of holding time in solution treatment and aging caused the expansion of grain boundary area. The result of OES examination showed the increasing of copper content inside the steel as much as 0,0905% and copper mapping showed that copper cluster had a trend to accumulate in the grain boundary. XRD examination showed the shifting of Fe peak which indicated the diffusion of Cu inside the Fe and new phase, $\text{Cu}_{0,003}\text{Fe}_{0,997}$ was formed. While hardness test's result exhibited the decreasing hardness number after aging process was performed.

Key Words : *AISI 1006 , aging, precipitation hardening, copperized, holding time, solution treatment.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir beserta laporan Tugas Akhir dengan baik tanpa suatu halangan apapundengan judul :

“Pengaruh Variasi Waktu Tahan *Solution Treatment* dan Aging terhadap Perubahan Mikro Struktur serta Kekerasan Copperized-AISI1006”

Laporan tugas akhir ini disusun untuk memenuhi syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir ini, penulis mendapat bimbingan, bantuan, petunjuk serta saran-saran dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Allah SWT, yang telah melimpahkan kemudahan, kelancaran, kesehatan, kekuatan, dan ridhoNya;
2. Orang tua dan keluarga penulis yang selalu mendoakan dan memberi semangat serta memberikan dukungan kepada penulis ;
3. Bapak Sutarsis S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing Tugas Akhir dan Dosen Wali penulis;
4. Ibu Rindang Fajarin , S.Si , M.Si., selaku *co*-pembimbing Tugas Akhir;
5. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Engselaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS;
6. Dosen Tim Penguji seminar dan sidang, serta seluruh dosen dan staff Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS;
7. Kepada para petugas dan karyawan Laboratorium Metalurgi dan Laboratorium Manufaktur Teknik Material dan Metalurgi yaitu Pak Anto, Pak Tari , Pak Chanan serta Mbak Is, laboran Divisi Karakterisasi Material Teknik Material dan

Metalurgi yang selalu membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir penulis;

8. Raka Satria Dewangga dan Ferdiansyah Iqbal R. yang telah ikhlas membantu, memberikan saran pada penulis dalam penyusunan laporan Tugas Akhir;
9. Seluruh teman-teman satu bimbingan yakni Tio,Vicky, Aprida, Zulkifli, Gafriansyah, Kukuh, Dieski, Angga Septa, Diksi, Iftitah dan Rani yang selalu menemani ,membantu dan mendukung dalam pengerjaan Tugas Akhir penulis.
10. Seluruh teman-teman anggota Laboratorium Metalurgi dan Laboratorium Material Inovatif yang menjadi tempat singgah penulis dalam penyusunan laporan;
11. Seluruh teman-teman Teknik Material dan Metalurgi ITS angkatan 2012, Keluarga Besar UKM KSR PMI ITS, Sahabat penulis yang tergabung dalam We are Happy dan 441 yang selalu mendo'akan,memberi semangat, dan mendukung penulis.
12. Seluruh anggota Himpunan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
13. Seluruh pihak yang tidak mampu penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu kelancaran Tugas Akhir ini. Terima kasih banyak atas segala do'a dan dukungannya. Semoga Allah SWT membalas dengan balasan yang terbaik. Amin yaa robbal allamin.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kesalahan dan kekurangan dalam laporan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat baik bagi penulis, pembaca, maupun pihak-pihak lain.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Baja	5
2.2 Baja AISI 1006	7
2.3 <i>High Strength Low Alloy</i> (HSLA)	8
2.3.1 Golongan <i>High Strength Low Alloy</i> (HSLA)	9
2.3.2 Aplikasi <i>High Strength Low Alloy</i> (HSLA)	10
2.4 Tembaga	10
2.4.1 Pengaruh Penambahan Tembaga dalam Baja	12
2.5 Difusi	15
2.5.1 Difusi Cu dan Fe	16
2.5.2 Perilaku Difusi Tembaga pada Baja	17
2.6 Perlakuan Panas	18
2.7 Presipitasi <i>Hardening</i>	19
2.7.1 <i>Solution Treatment</i>	20
2.7.2 <i>Solid Solution Strengthening</i>	21
2.7.3 Penuaan (<i>Aging</i>)	22
2.7.4 Presipitasi (<i>Precipitate Strengthening</i>)	23
2.8 Penelitian Sebelumnya	24
2.8.1 Pengaruh Tembaga dalam Baja Terhadap Kekuatan Tarik, Penghalusan Butir dan Perilaku Presipitasi	24

2.8.2	Presipitasi Tembaga dan Pengaruhnya terhadap Sifat Mekanik Baja <i>Microalloy</i> Karbon Rendah dengan Tiga Langkah Perlakuan Panas	26
2.8.3	Baja HSLA-100 : Pengaruh dari <i>Aging HeatTreatment</i> pada Mikrostruktur dan Sifatnya	28
2.8.4	Model Baru dari Presipitasi Interfasa Pada Baja yang Mengandung Tembaga.....	30
2.8.5	Analisis Pengaruh Tembaga terhadap Mikrostruktur dan Sifat Mekanik pada Baja <i>Microalloyed</i>	33
BAB III METODOLOGI		
3.1	Bahan dan Alat Penelitian	39
3.1.1	Bahan Penelitian.....	39
3.1.2	Alat Penelitian	39
3.2	Diagram Alir.....	42
3.3	Prosedur Penelitian.....	44
3.3.1	Preparasi Sampel Awal.....	44
3.3.2	Proses <i>Copperizing</i>	45
3.3.3	Proses <i>Precipitation Hardening</i>	47
3.3.4	Analisis Hasil Pengujian.....	49
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		
4.1	Analisis Data	53
4.1.1	Pengamatan Visual Makro.....	53
4.1.2	Pengujian <i>Optical Emission Spectroscopy</i> (OES)	58
4.1.3	Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> /EDX.....	60
4.1.4	Pengujian X-ray Diffraction (XRD)	77
4.1.5	Pengujian Metalografi (Struktur Mikro).....	88
4.1.6	Pengujian <i>Microhardness</i> Vickers.....	95
4.2	Pembahasan.....	99
BAB V KESIMPULANDAN SARAN		
5.1	Kesimpulan.....	103
5.2	Saran.....	103
DAFTAR PUSTAKA.....		xxxix
LAMPIRAN		
BIOGRAFI PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Fase Keseimbangan Fe- Fe ₃ C (Callister,2007)	6
Gambar 2.2 Logam Tembaga (USGS,2009).....	11
Gambar 2.3 Diagram fasa Fe – Cu (Chen,2007).....	14
Gambar 2.4 Difusi Substitusi (Vakansi) dan Interstisi.....	16
Gambar 2.5 Mekanisme Proses <i>Precipitation Hardening</i> (Taufiq&Korda, 2010)	21
Gambar 2.6 Perubahan Strukturmikro Selama Proses <i>Aging</i> (Smith,1993)	23
Gambar 2.7 Hubungan Keseimbangan Antara <i>Tensile</i> <i>Strength</i> dan <i>Elongation</i> Terhadap Penambahan Tembaga (Takaki,dkk,2004)	25
Gambar 2.8 Tembaga <i>cluster</i> yang Sudah <i>Diaging</i> Selama 20 Menit pada 450°C dengan Komposisi 4% (Takaki,dkk,2004).....	26
Gambar 2.9 Proses Perlakuan Panas 3 kali dengan Pendinginan Udara (Zhou,dkk,2014).....	27
Gambar 2.10 Hasil pengujian TEM (Zhou,dkk,2014)	28
Gambar 2.11 Hasil Pengujian Tarik dan Hardness untuk Material B dan C (Mujahid,dkk, 1997)	29
Gambar 2.12 Hasil Pengujian Impak (Mujahid,dkk, 1997)	30
Gambar 2.13 Transformasi <i>Isothermal</i> pada 675°C, <i>Holding</i> <i>Time</i> 1000 detik (Thompson, 1998).....	31
Gambar 2.14 Transformasi <i>Isothermal</i> pada 675°C , <i>Holding</i> <i>Time</i> 700 detik (Thompson, 1998).....	32
Gambar 2.15 Formasi dari BCC- Tembaga Interfasa Presipitat Sebelum dan Sesudah Transformasi pada Keseimbangan FCC ε-Tembaga pada Interfasa Ferit/Austenit (Thompson, 1998).....	33
Gambar 2.16 Hasil Pengamatan Mikroskop Optik Setelah <i>Aging</i> 30 Menit (A,B,C) Hanya <i>Aging</i> (D,E,F) <i>Cool</i>	

<i>Deformation</i> Pada Regangan 0,2 (Elwazri, dkk, 2007)	34
Gambar 2.17 Variasi Kekuatan Tiga Baja dengan Perlakuan <i>Cool Deformation</i> dan Waktu <i>Aging</i> : (a, b, c) <i>Yield Strength</i> dan (d, e, f) <i>Ultimate Tensile Strength</i> (Elwazri, dkk, 2007).	35
Gambar 2.18 Analisis Ukuran Presipitat FE-SEM 5 nm: (a) Gambar SE dari Partikel dan (b) <i>EDS Spectrum</i> Menunjukkan Puncak Nb (Elwazri, dkk, 2007).	36
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	43
Gambar 4.1 Hasil Foto Permukaan Spesimen (a) Tanpa Perlakuan dan (b) <i>Copperizing</i> 5 Menit	53
Gambar 4. 2 Hasil FotoPermukaan Spesimen Perlakuan <i>Solution Treatment</i> 900°C Waktu Tahan (a) 30 Menit dan (b) 60 Menit	54
Gambar 4.3 Hasil FotoPermukaan Spesimen <i>Solution Treatment</i> 900°C dengan Waktu Tahan dengan (a;b;c) 30 Menit dan (d;e;f) 60 Menit diikuti <i>Aging</i> 450°C dengan Waktu Tahan (a;d) 30 Menit, (b;e) 60 Menit dan (c;f) 90 Menit	55
Gambar 4.4 Hasil Foto Penampang Melintang Spesimen (a) Tanpa Perlakuan dan (b) <i>Copperizing</i> 5 Menit	56
Gambar 4.5 Hasil Foto Penampang Melintang Perlakuan <i>Solution Treatment</i> 900°C, dengan Waktu Tahan(a)30 Menit , (e) 60 Menit dan Perlakuan <i>Aging</i> 450°C , dengan Waktu Tahan (b;f) 30 Menit , (c;g) 60 dan (d;h) 90 Menit	57
Gambar 4.6 Hasil Pengujian Komposisi Unsur Spesimen Sebelum dan Sesudah <i>Copperizing</i>	59
Gambar 4.7 Hasil <i>Mapping</i> Tembaga Spesimen <i>Solution Treatment</i> 30 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah	61

Gambar 4.8 Hasil <i>Mapping</i> Tembaga Spesimen <i>Solution Treatment</i> 60 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah	63
Gambar 4.9 Hasil <i>Mapping</i> Tembaga Spesimen <i>Solution Treatment</i> 30 Menit dan <i>Aging</i> 30 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah	65
Gambar 4.10 Hasil <i>Mapping</i> Tembaga Spesimen <i>Solution Treatment</i> 30 Menit dan <i>Aging</i> 60 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah	67
Gambar 4.11 Hasil <i>Mapping</i> Tembaga Spesimen <i>Solution Treatment</i> 30 Menit dan <i>Aging</i> 90 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah	69
Gambar 4.12 Hasil <i>Mapping</i> Tembaga Spesimen <i>Solution Treatment</i> 60 Menit dan <i>Aging</i> 30 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah	71
Gambar 4.13 Hasil <i>Mapping</i> Tembaga Spesimen <i>Solution Treatment</i> 60 Menit dan <i>Aging</i> 60 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah	73
Gambar 4.14 Hasil <i>Mapping</i> Tembaga Spesimen <i>Solution Treatment</i> 60 Menit dan <i>Aging</i> 90 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah	75
Gambar 4.15 Hasil Pengujian <i>Spotting</i> EDX Pada Spesimen dengan Variabel Waktu Tahan <i>Solution Treatment</i> 60 Menit dan Waktu Tahan <i>Aging</i> 30 Menit.....	76
Gambar 4.16 Hasil Pengujian XRD Spesimen Tanpa Perlakuan	78
Gambar 4.17 Hasil Pengujian XRD Spesimen <i>Copperizing</i> dengan Waktu <i>Immerse</i> 5 Menit.....	79
Gambar 4.18 Hasil Pengujian XRD Spesimen dengan Variasi Waktu Tahan <i>Solution Treatment</i>	80
Gambar 4.19 Perubahan <i>Peak Broadening</i> Puncak Tertinggi untuk Variabel Waktu Tahan <i>Solution Treatment</i>	81
Gambar 4.20 Hasil Pengujian XRD Spesimen dengan <i>Solution Treatment</i> 30 Menit dengan Tiga Variasi Waktu Tahan <i>Aging</i>	82

Gambar 4.21	Perubahan <i>Peak Broadening</i> Puncak Tertinggi Variabel <i>Solution Treatment</i> 30 Menit.....	84
Gambar 4. 22	Hasil Pengujian XRD Spesimen dengan <i>Solution Treatment</i> 60 Menit dengan Tiga Variasi Waktu Tahan <i>Aging</i>	85
Gambar 4. 23	Perubahan <i>Peak Broadening</i> Puncak Tertinggi Variabel <i>Solution Treatment</i> 60 Menit.....	87
Gambar 4. 24	Hasil Struktur Mikro (a) Tanpa Perlakuan dan (b) <i>Copperizing</i> 5 Menit dengan Perbesaran 500	89
Gambar 4. 25	Hasil Struktur Mikro <i>Copperizing</i> 5 Menit dengan Perbesaran 1000	89
Gambar 4.26	Hasil Struktur Mikro <i>Copperized-AISI 1006 Solution Treatment</i> dengan Waktu Tahan (a) 30 Menit dan (b) 60 Menit dengan Perbesaran 500.....	90
Gambar 4.27	Hasil Struktur Mikro <i>Copperized-AISI 1006 Solution Treatment</i> dengan Waktu Tahan 60 Menit dengan Perbesaran 1000	91
Gambar 4.28	Hasil Struktur Mikro <i>Copperized-AISI 1006 Solution Treatment</i> dengan Waktu Tahan (a;b;c) 30 Menit dan (d;e;f) 60 Menit kemudian <i>Aging</i> dengan Waktu Tahan (a;d) 30 Menit, (b;e) 60 Menit dan (c;f) 90 Menit dengan Perbesaran 500	92
Gambar 4.29	Hasil Struktur Mikro <i>Copperized-AISI 1006 Solution Treatment</i> dengan Waktu Tahan 30 Menit dan <i>Aging</i> 90 Menit Perbesaran 1000	93
Gambar 4.30	Grafik Perubahan Luas Daerah Batas Butir Spesimen Setelah Perlakuan	94
Gambar 4.31	Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan <i>Uncopperizing</i> dan <i>Copperizing</i> AISI 1006 dengan <i>Solution Treatment</i> 30 Menit serta Variasi Waktu Tahan <i>Aging</i>	96
Gambar 4.32	Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan <i>Uncopperizing</i> dan <i>Copperizing</i> AISI 1006 dengan <i>Solution Treatment</i> 60 Menit serta Variasi Waktu Tahan <i>Aging</i>	98

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Data komposisi kimia AISI 1006 (ASTM A830, 2003)	8
Tabel 2.2 <i>Mechanical Properties</i> AISI 1060 (ASTM International, 2000)	8
Tabel 2.3 Karakteristik Tembaga (<i>Copper Development Association</i> , 1998)	12
Tabel 2.4 Keterangan Komposisi Diagram Fasa Fe-Tembaga	15
Tabel 4.1 Hasil EDX untuk <i>Solution Treatment</i> 30 Menit	62
Tabel 4.2 Hasil EDX untuk <i>Solution Treatment</i> 60 Menit	64
Tabel 4.3 Hasil EDX untuk <i>Solution Treatment</i> 30 Menit, <i>Aging</i> 30 Menit	66
Tabel 4.4 Hasil EDX untuk <i>Solution Treatment</i> 30 Menit, <i>Aging</i> 60 Menit	68
Tabel 4.5 Hasil EDX untuk <i>Solution Treatment</i> 30 Menit, <i>Aging</i> 90 Menit	70
Tabel 4.6 Hasil EDX untuk <i>Solution Treatment</i> 60 Menit, <i>Aging</i> 30 Menit	72
Tabel 4. 7 Hasil EDX untuk <i>Solution Treatment</i> 60 Menit, <i>Aging</i> 60 Menit	74
Tabel 4. 8 Hasil EDX untuk <i>Solution Treatment</i> 60 Menit, <i>Aging</i> 90 Menit	74
Tabel 4.9 Perubahan Nilai Microstrain Tiap Variasi Waktu Tahan	88
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian <i>Hardness</i> Spesimen <i>Uncopperizing</i> dan <i>Copperizing</i> dengan <i>Solution Treatment</i> 30 Menit serta Variasi Waktu Tahan <i>Aging</i>	95
Tabel 4. 11 Hasil Pengujian <i>Hardness</i> Spesimen <i>Uncopperizing</i> dan <i>Copperizing</i> dengan <i>Solution Treatment</i> 60 Menit serta Variasi Waktu Tahan <i>Aging</i>	97



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tembaga berperan penting dalam industri manufaktur logam. Tembaga dianggap sebagai pilihan yang tepat sebagai elemen paduan pada baja karena relatif murah dan mudah penanganannya. Tembaga juga meningkatkan sifat kelelahan (*fatigue*) pada baja. Karakteristik terbaik yang dimiliki oleh paduan baja dan tembaga adalah peningkatan ketahanan terhadap korosi (Groysman, 2010). Akan tetapi penambahan unsur tembaga sebagai paduan pada baja akan menurunkan sifat mekaniknya jika kadar tembaga ditingkatkan dan tidak dikontrol (Sekunowo, dkk., 2014). Salah satu cara yang dapat ditempuh untuk meningkatkan kekuatan suatu paduan logam, yaitu melalui proses perlakuan panas (*heattreatment*) salah satunya adalah dengan *aging* (Taufiq & Korda, 2010). Tembaga meningkatkan kekuatan tarik dari baja karena adanya *precipitation hardening*. Sebagai contoh adalah *High Strength Low Alloy* dan baja tahan karat yang secara komersial diproduksi dalam bentuk pelat dengan memanfaatkan efek dari *precipitation hardening* dari tembaga (Kishida, 1995).

Age hardening atau yang biasa disebut dengan *precipitation hardening* merupakan suatu proses dimana baja dan paduannya dipanaskan dan melalui proses *solution treatment*. Tujuannya untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan dari paduan tersebut. Keberadaan tembaga dalam baja merupakan alasan *precipitation hardening* dilakukan pada baja selain itu penambahan tembaga di dalam baja dapat berperan sebagai *grain refinement agent* dan *solid solution strengthening agent* (Takaki, 2004). Presipitasi tembaga terbentuk selama proses *aging* karena kelarutan tembaga yang rendah dalam ferit. Penambahan tembaga pada baja meningkatkan kekuatan luluh melalui penguatan presipitasi, dan dapat meningkat lebih lanjut membentuk presipitasi selama proses *aging* di temperatur kisaran 500-550°C (Zhou, dkk., 2014). Temperatur dan waktu *aging*

merupakan parameter penting dalam proses *precipitation hardening* (Panwar, dkk., 2006)

Terdapat beberapa metode pemaduan tembaga dengan logam lain, diantaranya metode *copper clad steel* dan *furnace brazing*. Namun dalam penelitian ini metode yang dilakukan adalah metode yang mengadopsi proses *hot dip coating* yang dinamakan *copperizing*. Prinsip penambahan tembaga dalam keadaan liquid pada permukaan mirip dengan difusi pada *carburizing*, *nitriding* dan metode serupa lainnya yang hanya terjadi pada permukaan (Chaniago, 2015)

Dari penelitian sebelumnya yang telah dilakukan diketahui bahwa tembaga mampu berdifusi ke dalam baja dengan metode *copperizing*, dimana konsentrasi tembaga pada hasil *copperizing* dengan pendinginan normal lebih merata dibandingkan hasil *copperizing* dengan pendinginan *quenching*. Selain itu metode ini mampu meningkatkan kemampuan elongasi baja. (Isori, dkk., 2015).

Pada penelitian sebelumnya, mengidentifikasi bagaimana mekanisme difusi serta perilaku tembaga dalam baja dapat mempengaruhi perubahan dari sifat mekanik baja. Maka dari itu, pada penelitian kali ini, dilakukan penelitian tentang pengaruh penambahan tembaga melalui identifikasi karakterisasi struktur material untuk menunjang penelitian tersebut. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *copperizing* baja AISI 1006 diikuti dengan proses *precipitation hardening* dengan variasi waktu tahan *solution treatment* dan *aging*. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh waktu tahan proses *precipitation hardening* pada *copperized*-AISI 1006 terhadap struktur mikro, pengaruh penambahan tembaga, meliputi topografi permukaan, dan pengaruhnya terhadap pembentukan fasa serta kekerasan baja setelah melalui proses *precipitation hardening*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dianalisis dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh penambahan tembaga pada baja AISI 1006 setelah melalui proses *copperizing* diikuti dengan *precipitation hardening*?
2. Bagaimana pengaruh waktu tahan *solution treatment* dan waktu tahan *aging* terhadap perubahan struktur mikro *copperized*-AISI 1006?
3. Bagaimana pengaruh waktu tahan *solution treatment* dan waktu tahan *aging* terhadap kekerasan *copperized*-AISI 1006?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah digunakan agar penelitian tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau dan memberikan hasil yang terbaik. Berikut ini adalah batasan masalah dalam penelitian ini :

1. Kecepatan pengangkatan substrat dianggap konstan.
2. Perubahan temperatur dari substrat saat proses *copperizing* diabaikan.
3. *Crucible graphite* dianggap tidak bereaksi dengan tembaga cair.
4. Tembaga yang digunakan untuk proses dianggap murni dan cair sempurna.

1.4 Tujuan Penelitian

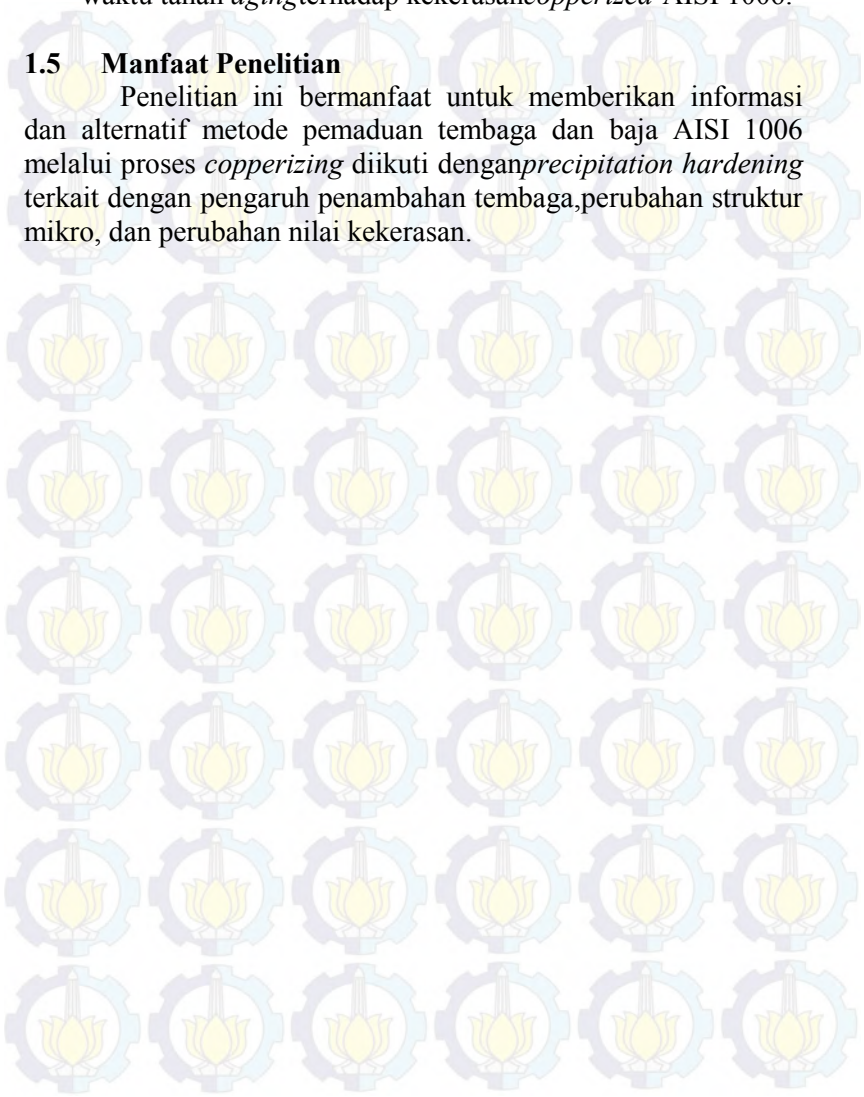
Tujuan dilakukannya penelitian ini sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh penambahan tembaga pada baja AISI 1006 setelah melalui proses *copperizing* diikuti dengan *precipitation hardening*.
 2. Menganalisis pengaruh waktu tahan *solution treatment* dan waktu tahan *aging* terhadap perubahan struktur mikro *copperized*-AISI 1006 .
-

-
3. Menganalisis pengaruh waktu tahan *solution treatment* dan waktu tahan *aging* terhadap kekerasan *copperized*-AISI 1006.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk memberikan informasi dan alternatif metode pepaduan tembaga dan baja AISI 1006 melalui proses *copperizing* diikuti dengan *precipitation hardening* terkait dengan pengaruh penambahan tembaga, perubahan struktur mikro, dan perubahan nilai kekerasan.

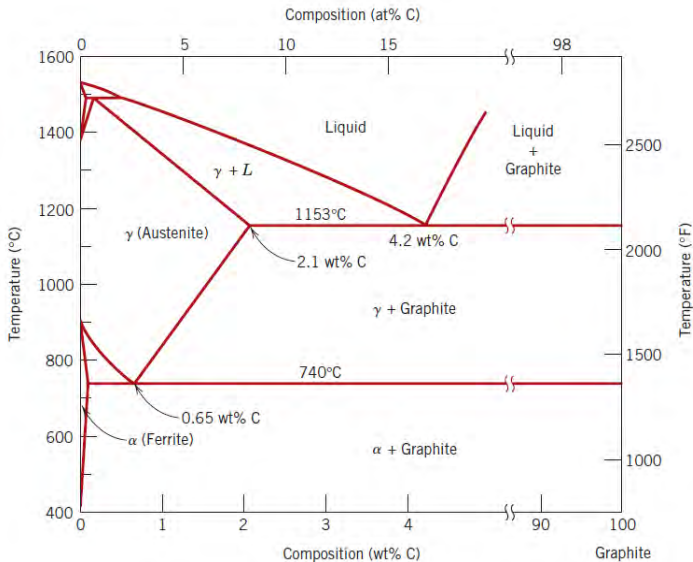


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja

Baja merupakan paduan dari besi dan karbon, dengan kadar karbon maksimal 1,5%. Karbon yang terbentuk merupakan karbida besi, karena kemampuannya untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja. Unsur-unsur lain misalnya silikon, belerang, fosfor dan mangan juga hadir dalam jumlah besar maupun kecil untuk memberikan sifat mekanik tertentu yang diinginkan. Baja secara luas digunakan karena kelimpahan besi dalam kerak bumi; titik leleh tinggi yang mencapai 1534°C; memiliki *yield strength* hingga mencapai 300 Mpa serta keuletan yang baik dengan yield stress sebesar 1400 Mpa (Totten, 2006). Berikut ini adalah klasifikasi baja karbon menurut *Steel Heat Treatment Handbook* :

- Baja karbon rendah adalah baja dengan kandungan karbon sebanyak 0,10 – 0,25%C yang meningkatkan kekuatan dan kekerasan dan mengurangi sifat mampu bentuk dibandingkan dengan kelompok karbon terendah. Mereka didesain sebagai baja karburasi atau *casehardening*.
- Baja karbon sedang adalah baja dengan kandungan karbon 0,30-0 0,55%C digunakan untuk memperoleh sifat mekanik yang lebih tinggi. Mereka biasanya dikeraskan dan diperkuat oleh perlakuan panas atau *coldwork*.
- Baja karbon tinggi adalah baja dengan kandungan karbon 0.55–1 .00% C, lebih terbatas penggunaannya daripada baja karbon sedang karena biaya produksi yang lebih tinggi dan sifat mampu bentuk (*formability*) dan mampu las yang rendah.



Gambar 2.1 Diagram Fase Keseimbangan Fe- Fe₃C
(Callister,2007)

Sifat mekanis baja juga dipengaruhi oleh adanya ikatan karbon dengan besi. Terdapat tiga bentuk utama kristal saat karbon mengadakan ikatan dengan besi, yaitu :

1. Ferit, yaitu besi murni (Fe) terletak rapat saling berdekatan tidak teratur, baik bentuk maupun besarnya. Ferit merupakan bagian baja yang paling lunak, ferrit murni tidak akan cocok digunakan sebagai bahan untuk benda kerja yang menahan beban karena kekuatannya kecil.
2. Karbid besi (Fe₃C), suatu senyawa kimia antara besi dengan karbon sebagai struktur tersendiri yang dinamakan sementit. Peningkatan kandungan karbon akan menambah kadar sementit. Sementit dalam baja merupakan unsur yang paling keras.

3. Perlit, merupakan campuran antara ferit dan sementit dengan kandungan karbon sebesar 0,8%. Struktur perlit mempunyai kristal ferrit tersendiri dari serpihan sementit halus yang saling berdampingan dalam lapisan tipis mirip lamel.

Bila kadar karbon dalam baja melampaui 0,20%, temperatur dimana sifat ferit mulai terbentuk dan mengendap dari austenite akan mengalami penurunan. Baja yang berkarbon 0,80% disebut baja *eutectoid* dan struktur terdiri dari 100% *pearlite*. Titik *eutectoid* adalah temperatur terendah dalam logam dimana terjadi perubahan dalam keadaan larut padat dan merupakan temperatur keseimbangan terendah dimana *austenite* terurai menjadi ferit dan *cementite*. Bila kadar karbon baja lebih besar dari pada *eutectoid*, perlu diamati garis pada diagram besi dan karbida besi. Garis ini menyatakan temperatur dimana karbida besi mulai memisah dari austenite. Karbida besi ini dengan rumus Fe_3C disebut *cementite*. *Cementite* sangat keras dan getas. Baja yang mengandung kadar karbon kurang dari eutectoid (0,80%) disebut baja *hypoeutectoid* dan baja yang mengandung kadar karbon lebih dari *eutectoid* disebut baja *hypereutectoid* (Jamal & Adma, 2012)

2.2 Baja AISI 1006

Baja ini merupakan baja karbon sangat rendah (*dead mild steel*) apabila digolongkan dari kadar karbonnya. Kadar karbon pada baja ini maksimal 0,08 %C dan paduan unsur mangan maksimal sekitar 0.45%Mn. AISI 1060 secara luas digunakan karena sifat mekaniknya yang mudah dibentuk, lunak dan *weldability* yang baik. Contoh aplikasinya berupa plat kapal, baja konstruksi, komponen mesin, dan material pipa . Kadar komposisi baja AISI 1006 seperti dituliskan dalam ASTM A830-A830M dapat dilihat pada **Table 2.1** berikut.

Tabel 2.1 Data komposisi kimia AISI 1006 (ASTM A830, 2003)

Elements	wt. %
Carbon, C	0.08 max
Iron, Fe	99,08-99,53
Manganese, Mn	0,45 max
Phosphorous, P	< 0,035 max
Sulfur, S	< 0,04 max

Tabel 2.2 Mechanical Properties AISI 1060 (ASTM International, 2000)

Mechanical Properties	NILAI
Hardness	95 HB
Density	7.87 (g/cm ³)
Tensile Strength	330 MPa
Yield Strength	285 MPa

2.3 High Strength Low Alloy (HSLA)

Baja yang mengandung karbida, nitrida atau elemen pembentuk karbonitrida seperti titanium, vanadium, niobium dan aluminium sering didefinisikan sebagai baja *High Strength Low Alloy* (HSLA) dan biasanya lebih kuat dari baja mangan karbon rendah. Jumlah yang kecil dari kromium, nikel, molibdenum, tembaga, fosfor dan zirkonium dapat ditambahkan di berbagai kombinasi untuk mencapai sifat tertentu, contohnya penambahan tembaga dan fosfor untuk meningkatkan ketahanan oksidasi. Baja HSLA juga didefinisikan sebagai baja *microalloyed* (total paduan elemen ~ 0,1%) atau baja paduan rendah (total elemen paduan ~ 5%) tetapi tidak dianggap sebagai baja paduan karena HSLA telah dirancang untuk mencapai sifat mekanik tertentu dari komposisi kimia tertentu. Mekanisme penguatannya dengan

precipitation hardening dan penghalusan ukuran butir (*grain size refinement*) yang dapat mencapai tingkat kekuatan tinggi.

2.3.1 Golongan High Strength Low Alloy (HSLA)

Baja HSLA diklasifikasikan secara terpisah sebagai kategori baja, yang menyerupai sebagai *rolled mild-carbon steels* dengan sifat mekanik yang ditingkatkan dan diperoleh dengan penambahan sejumlah kecil paduan serta teknik pengolahan khusus seperti metode pengerollan yang dikendalikan dan pendinginan yang dipercepat. HSLA diakui sebagai produk terpisah dari baja karena diketahui bahwa harga baja HSLA umumnya merupakan harga dasar untuk baja karbon, dan bukan harga dasar untuk baja paduan. HSLA dapat dibagi menjadi enam kategori sesuai dengan ASM *International Alloying*, 2011, sebagai berikut:

- *Weathering steels*, yang mengandung sejumlah kecil elemen paduan seperti tembaga dan fosfor untuk meningkatkan ketahanan korosi dan penguatan *solid-solution*.
 - *Microalloyed ferrite-pearlite steels*, yang mengandung sangat kecil (umumnya, kurang dari 0,10%) penambahan karbida kuat atau elemen pembentuk karbonitrida seperti niobium, vanadium, dan titanium untuk penguatan presipitasi, perbaikan butir, dan transformasi kontrol temperatur.
 - *As-rolled perlitic steels*, yang mungkin termasuk baja karbon-mangan yang juga memiliki penambahan sedikit elemen paduan lain untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, sifat mampu bentuk (*formability*), dan mampu las.
 - *Acicular ferrite (low-carbon bainite) steels*, yang mana merupakan baja karbon rendah (kurang dari 0,05% C) dengan kombinasi yang sangat baik dari *yield strengths* yang tinggi, (setinggi 690 MPa, atau 100 ksi) mampu las,
-

sifat mampu bentuk (*formability*), dan ketangguhan yang baik.

- *Dual-phase steels*, yang memiliki struktur mikro martensit tersebar dalam matriks feritik dan memberikan kombinasi yang baik dari keuletan dan kekuatan tarik yang tinggi.
- *Inclusion-shape-controlled steels*, yang mampu meningkatkan keuletan dan ketangguhan dengan sedikit penambahan kalsium, zirkonium, atau titanium, atau rare earth elements sehingga bentuk inklusi sulfida berubah dari balok memanjang menjadi kecil, tersebar, tetesan yang berbentuk bulat (ASM *International Alloying*, 2011).

2.3.2 Aplikasi *High Strength Low Alloy* (HSLA)

Aplikasi dari baja HSLA ini termasuk perpipaan minyak dan gas, pekerjaan berat di jalan raya, kendaraan *off-road*, konstruksi permesinan, peralatan industri, tanki penyimpanan, mobil penambangan dan sebagainya. Pemilihan dari spesifikasi baja kekuatan tinggi ini berdasarkan dari kebutuhan aplikasi seperti pengurangan ketebalan, ketahanan korosi, mampu bentuk (*formability*), dan mampu las (*weldability*). Dalam banyak aplikasinya, faktor yang terpenting pada baja adalah proses pemilihannya yang baik dari kekuatan hingga rasio berat dari baja HSLA dibandingkan dengan baja karbon rendah konvensional lainnya (ASM *International Alloying* 2011).

2.4 Tembaga

Tembaga, unsur dengan nomor atom 29 dan termasuk kedalam golongan IB dalam tabel periodik unsur. Tembaga merupakan logam transisi dan logam mulia sama halnya dengan emas dan perak, memiliki struktur kristal berbentuk *face centered cubic*. Tembaga merupakan logam setelah baja yang banyak digunakan sejak dahulu kala karena memiliki kemampuan dimesin/dikerjakan yang baik, daya tahan korosi, konduktor listrik dan panas yang tinggi.. Tembaga memiliki daya tahan

korosi yang baik di dalam air, dalam tanah maupun dalam air laut, hal ini disebabkan adanya lapisan oksida yang melapisi permukaannya. Tembaga memiliki kekuatan tarik menengah dan dapat ditingkatkan dengan pepaduan seng atau timah menjadi *brass*(kuningan) dan *bronze*(perunggu) (*Copper Development Association*,1998).



Gambar 2.2 Logam Tembaga (USGS,2009)

Logam ini dapat dengan mudah disolder dan *brazing*, dan dapat dilas oleh berbagai jenis las seperti gas, busur (*arc*) dan metode *resistance* serta bisa dipoles dan digosok sesuai dengan tekstur yang diinginkan dan berkilau. Tembaga murni umumnya digunakan sebagai kabel, kawat, dan berbagai produk penghantar listrik. Tembaga, perunggu, kuningan, dan *cupronickels* banyak diaplikasikan pada radiator kendaraan, *heat exchanger*, sistem pemanas, panel dari *solar cell*, dan berbagai aplikasi penghantar panas. Karena memiliki ketahanan korosi yang baik, tembaga banyak dipakai sebagai bahan pipa, katup, dan berbagai produk yang mengalirkan fluida. Tembaga dikatakan murni apabila komposisi tembaga lebih dari 99,5%.

Tabel 2.3 Karakteristik Tembaga (*Copper Development Association, 1998*)

Sifat-sifat	Tembaga Murni
Struktur kristal	FCC
Densitas pada 20°C (sat. 103kg/m ³)	8.93
Titik cair (°C)	1083
Koefisien mulur panas kawat 20°~100°C (10-6/K)	17.1
Konduktifitas panas 20°~400°C (W/(m_K))	393
Tahanan listrik 20°C (10-8 KW_m)	1.673
Modulus elastisitas (GPa)	128
Modulus Kekakuan (Gpa)	46.8

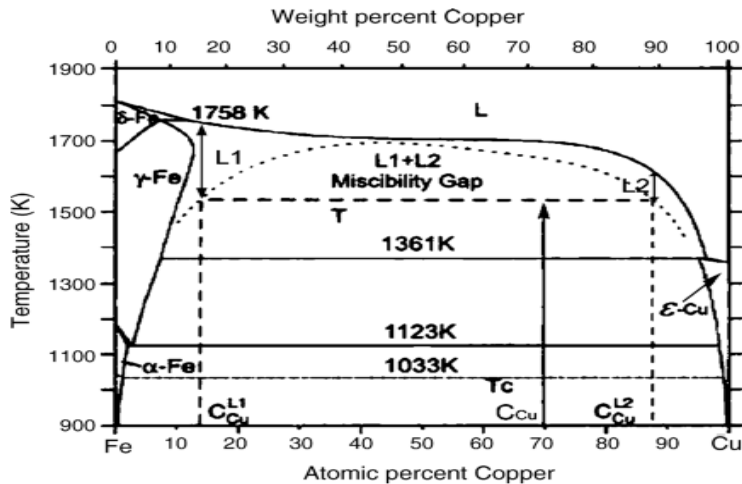
2.4.1 Pengaruh Penambahan Tembaga dalam Baja

Kadar tembaga dalam baja harus tetap terkontrol dan tidak melebihi batas tertentu karena kecenderungannya untuk terjadi distorsi mikrostruktural. Adanya jumlah tembaga melebihi 0,25 wt% biasanya menghasilkan pembentukan senyawa kompleks dan mengakibatkan distorsi serius pada mikrostruktur baja. Tembaga juga diketahui menjadi penyebab adanya kecacatan permukaan baja karena oksidasi dari permukaan yang kaya tembaga (Sekunowo, dkk, 2014). Penambahan tembaga pada baja paduan biasanya dilakukan agar meningkatkan ketahanan korosi atmosfer dan meningkatkan kemampuan presipitasi hardening. Tembaga juga memperlihatkan pengaruh yang menarik pada baja lasan. Penambahan tembaga pada material lasan ataupun baja lasan dapat meningkatkan presipitasi, yang mana memungkinkan untuk adanya pengurangan kadar karbon dalam logam las. Dengan menurunnya kandungan karbon, dapat meningkatkan

kemampuan las baja dan memungkinkan untuk mengurangi adanya *pre treatment* (Moline, 2010).

Tembaga adalah pembentuk austenit yang kuat. Penguatan ferit dengan tembaga kurang daripada unsur paduan konvensional lainnya. Penambahan tembaga ke baja terutama untuk pengerasan presipitasi. Presipitasi tembaga terjadi pada saat *aging* akibat kelarutan tembaga yang rendah dalam *ferrite*. Penambahan tembaga dalam baja meningkatkan *yield strength* melalui *precipitation strengthening*, dan dapat terus ditingkatkan untuk membentuk presipitat pada *range* temperatur 500-550°C (Zhou, dkk, 2014).

Umumnya bentuk penguatan dengan tembaga dilakukan dalam bentuk metalurgi serbuk, karena kelebihanannya dalam sifat mekanik yang baik, *sinterability*, dan biaya yang cukup bersaing. Namun, tetap harus dengan kontrol dimensi yang ketat (Marucci, dkk., 2011). Presipitasi tembaga dalam baja merupakan fenomena yang sudah cukup dikenal dan berpotensi untuk memperoleh keseimbangan *strength-ductility* daripada *high-strength steel* konvensional karena perbedaan sifat dari presipitat tembaga dari presipitat lainnya seperti karbida dan nitrida. Di sisi lain, penguatan dapat dilakukan dengan metode *grain-refinement* (Takaki, dkk., 2004). Observasi metalografi menunjukkan adanya pengecilan ukuran *ferrite*, akibat adanya tembaga yang menghambat rekristalisasi *austenite* dan menghambat transformasi *austenite* ke *ferrite* (Ruddle, 2002). Dalam proses *grain-refinement*, partikel karbida dan nitrida memainkan peran penting dengan mengontrol proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir. Dan memungkinkan untuk tembaga untuk membentuk presipitat yang lebih baik daripada karbida dan nitrida, serta menghasilkan ukuran butir yang lebih halus (Takaki, dkk., 2004).



Gambar 2.3 Diagram fasa Fe – Cu (Chen,2007)

Paduan antara logam tembaga dengan besi digambarkan oleh diagram fasa kesetimbangan Fe-Cu pada **Gambar 2.3**, terlihat adanya garis putus-putus yang menunjukkan garis liquidus untuk *metastable miscibility gap*. Fasa *liquid* metastabil yang terpisah menyatakan bahwa paduan leleh mengalami pendinginan dibawah garis *metastable miscibility gap* (Chen,2007). Tembaga dan besi terlarut sempurna dalam kondisi lebur. Ketika sedikitnya 0,1 wt.% karbon terdapat dalam besi, kemampuan larut sempurna tidak terjadi. Selama solidifikasi, sekitar 10 wt.% tembaga akan ditahan dalam *solid solution* substitusi dengan besi delta dan gamma. Bagaimanapun, selama transformasi menjadi besi alfa, kemampuan untuk larut menurun (hanya untuk 2 atau 3 wt.%), dengan demikian selama pendinginan lambat ke temperatur kamar mendekati kondisi ekuilibrium, sebanyak kurang dari 1 wt.% tembaga akan ditahan dalam *solution* (Avazkonandeh, 2009).

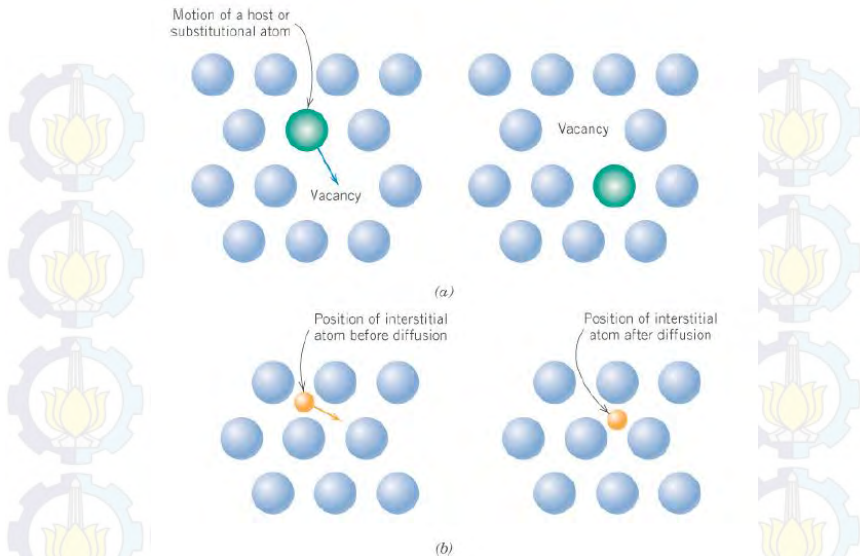
Pada **Tabel 2.4** merepresentasikan kandungan Tembaga di beberapa titik fasa yang terbentuk.

Tabel 2.4 Keterangan Komposisi Diagram Fasa Fe-Tembaga
(ASM Handbook Volume 3)

Fasa	Komposisi wt% Tembaga	Simbol Pearson	Space Group
δ Fe	0-7,6	cI2	Im3m
γ Fe	0-13	cF4	Fm3m
α Fe	0-2.2	cI2	Im3m
Tembaga	95,9-100	cF4	Fm3m

2.5 Difusi

Banyak reaksi dan proses yang penting dari perlakuan material bergantung pada transfer massa entah dalam padatan tertentu (biasanya dalam tingkat mikroskopis) atau dari *liquid*, gas, atau fasa *solid* lainnya. Ini dapat dicapai dengan difusi, fenomena transport material oleh pergerakan atomik. Difusi adalah peristiwa mengalirnya/berpindahannya suatu zat dalam pelarut dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah. Perbedaan konsentrasi yang ada pada dua larutan disebut gradien konsentrasi. Difusi dapat terjadi pada *solid*, *liquid* maupun gas. Umumnya difusi pada *solid* dibagi atas beberapa jenis, ada yang berdasarkan proses terjadinya, maupun mekanisme terjadinya. Berdasarkan proses terjadinya difusi pada *solid* terbagi menjadi dua jenis yaitu interdifusi dan *self diffusion*, sedangkan berdasarkan mekanismenya difusi pada *solid* terbagi atas dua jenis yaitu difusi interstisi dan difusi substitusi (Callister, 2007). Fenomena yang terjadi selama proses perlakuan panas kebanyakan melibatkan difusi atom. Banyak reaksi dan proses yang penting dalam perlakuan material bergantung pada transfer massa dalam *solid* (biasanya pada level mikroskopis) atau dari *liquid*, gas, atau fasa *solid* lain.



Gambar 2.4 Difusi Substitusi (Vakansi) dan Interstisi
(Callister, 2007)

2.5.1 Difusi Cu dan Fe

Difusi baja dalam tembaga cair telah dilakukan pada *range* temperatur 1100-1300°C. Terindikasi bahwa difusi batas butir dari tembaga yang utama terjadi pada temperatur $\leq 815^{\circ}\text{C}$ dalam fase α . Dalam fase γ , difusi batas butir yang utama terjadi pada temperatur $\leq 1250^{\circ}\text{C}$. *Autoradiograph* mengkonfirmasi adanya difusi tembaga pada daerah batas butir serta indikasi adanya gumpalan Cu pada batas butir sebagai Cu yang terjebak oleh inklusi proses presipitasi yang dihubungkan dengan adanya pengotor dalam larutan (Rothman dkk, 1968). Perilaku difusi berdasar gradien sepanjang batas butir ferit bisa dituliskan sebagai berikut: (1) konsentrasi Cu pada batas butir yang lebar tidak sama seperti yang berada pada batas butir yang sempit, adanya jarak difusi yang lebih besar dan konsentrasi yang lebih tinggi di batas butir lebar, serta laju penurunan konsentrasi Cu

yang lebih rendah saat penetrasi ke dalam batas butir lebar; (2) konsentrasi Cu dekat permukaan (umumnya 6,5-8%), yang turun seiring dengan bertambahnya jarak difusi, lebih rendah dari kelarutan Cu dalam α -Fe(Cu) pada saat temperatur 1100-1200°C sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Yourong Xu pada tahun 1993.

Tembaga yang berdifusi ke dalam baja dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah kadar karbon dan temperatur pada saat proses pendifusian. Namun salah satu faktor yang memiliki efek yang cukup besar dalam pendifusian tembaga ke dalam Fe adalah temperatur pada saat proses pendifusian. Sedangkan perbedaan kadar karbon memiliki pengaruh yang tidak terlalu signifikan pada proses pendifusian Cu ke dalam Fe (Rassoul, 1997).

2.5.2 Perilaku Difusi Tembaga pada Baja

Pada baja komersial, tembaga merupakan elemen yang ditambahkan, keberadaannya sebagai logam paduan atau sebagai impuritas. Baja berkekuatan tinggi misalnya, akan presipitat Tembaga dalam skala nanometer untuk menyediakan *precipitate hardening* yang banyak dalam matriks Fe sementara efek pengerasan dari presipitat tembaga telah lama diketahui (Liu, 2005).

Difusi dari tembaga cair cenderung mengakibatkan *crack* dan menyerang ke dalam batas butir. Hal ini bergantung pada kemampuan tembaga cair membasahi logam Fe dalam keadaan padat. Beberapa kalkulasi empiris sebelumnya menyebutkan bahwa ada beberapa tipe baja yang lebih mudah dipenetrasi oleh tembaga cair pada fasa *austenite* (Savage, dkk., 1978).

Tembaga cair dapat didifusikan ke dalam substrat padat baja, seperti halnya sebagian tembaga cair yang berdifusi pada proses *furnace brazing*, yaitu ke dalam permukaan substrat baja tanpa *pre-heat* sebelumnya (Molleda, 2008). Difusi tembaga cair dengan padatan baja memungkinkan untuk dilakukan. Hal ini dapat terjadi dengan mekanisme tertentu. Tiga mekanisme difusi

untuk fenomena ini antara lain; (1) Tembaga berdifusi ke dalam baja di sepanjang batas butir *ferrite*, (2) Tembaga berdifusi ke dalam butir *ferrite*, dan (3) Fe yang berdifusi ke dalam lapisan tembaga (Xu dkk., 1993).

Kemampuan difusi tembaga hingga kedalaman 10 - 20 μ m. Penurunan konsentrasi makin jelas ketika kedalaman difusi 10-15 μ m. Penurunan konsentrasi mencapai 0,14% (dibawah 1%) pada kedalaman 10 μ m dengan ukuran butir lebih kecil dan batas butir yang lebih sempit. Namun dalam hal ini bentuk difusi dari Cu di dalam substrat dan dalam struktur dari baja beragam tergantung dari kedalaman penetrasinya dan daerah yang terpenetrasi. Jumlah Cu yang mampu berdifusi pada batas butir lebih banyak pada daerah *triple grain boundary* dibanding daerah batas butir yang lebih sempit. Selain itu, juga terjadi difusi ke dalam butir ferit dengan jumlah yang bervariasi dengan parameter tertentu. Hal ini membuktikan bahwa ukuran butir menjadi sangat kecil dan membentuk struktur jaringan padat untuk membentuk daerah ikatan Cu yang sangat kuat dan sangat kokoh tanpa merusak keuletannya (Xu dkk., 1993).

2.6 Perlakuan Panas

Jenis material yang ada saat ini, khususnya logam semakin baik dan rumit, digunakan pada peralatan modern yang memerlukan material dengan kekuatan impak dan ketahanan *fatigue* yang tinggi disebabkan meningkatnya kecepatan putar dan pergerakan linear serta peningkatan frekuensi pembebanan pada komponen. Untuk mendapatkan kekuatan dari material tersebut dapat dilakukan dengan proses perlakuan panas. Perlakuan panas adalah suatu proses pemanasan dan pendinginan logam dalam keadaan padat untuk mengubah sifat-sifat fisis logam tersebut.

Terjadinya perubahan sifat tersebut dikarenakan terjadi perubahan struktur mikro selama proses pemanasan dan pendinginan, dimana sifat baja/logam atau paduan sangat dipengaruhi oleh struktur mikronya. Perlakuan panas dibedakan : (a) proses laku panas dengan kondisi equilibrium, seperti proses

anil, *normalizing*, (b) proses laku panas *non-equilibrium*, seperti pengerasan (*hardening*). Proses annealing untuk baja hypoeutektoid dilakukan dengan memanaskan sampai temperatur sedikit di atas temperatur kritisnya A3 ($250^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$ di atas temperatur A3), dan ditahan beberapa saat pada temperatur tersebut, kemudian didinginkan dengan laju pendinginan lambat di dalam dapur. Sifat baja hasil proses annealing adalah menjadi lebih lunak dan ulet. (tegangan tarik dan kekerasannya menurun) (Suherman, 1990).

2.7 Presipitasi *Hardening*

Presipitasi *hardening* adalah pengerasan dengan perlakuan panas yang sering digunakan terhadap paduan non-ferrous. *Precipitation hardening* dilakukan dalam 2 proses, yaitu *solution treatment* dan *aging*. Proses *solution treatment* merupakan proses pemanasan paduan sampai melewati garis solvus dan berada pada fasa α . Kemudian paduan ditahan pada temperatur tersebut untuk beberapa saat. Selanjutnya paduan tersebut diberikan perlakuan *quench*, yaitu menurunkan dengan cepat temperatur paduan tersebut. Setelah proses *solution treatment* adalah proses *aging*. Lalu proses penurunan temperaturnya dilakukan dengan lambat. *Strengthening*, sebagai hasil dari pengerasan presipitasi, berlangsung dalam tiga langkah:

1. *Solution treatment*, di mana paduan dipanaskan sampai temperatur yang relatif tinggi, memungkinkan setiap endapan atau elemen paduan untuk membentuk larutan padat lewat jenuh. Temperatur *solution treatment* untuk baja berada di kisaran 982°C hingga 1066°C (1800°F hingga 1950°F).
2. *Quenching*, di mana larutan paduan diperlakukan dengan pendinginan untuk membuat larutan padat lewat jenuh. Pendinginan dapat dilakukan dengan menggunakan udara, air atau minyak. Secara umum, semakin cepat laju pendinginannya maka lebih halus ukuran butir yang terbentuk sehingga menyebabkan peningkatan sifat mekanik.

Terlepas dari metode pendinginan, laju pendinginan harus cukup cepat untuk membuat larutan padat lewat jenuh.

3. Penguatan presipitasi atau penuaan, dimana paduan yang telah didinginkan secara cepat (*quench*) dipanaskan pada temperatur *intermediate* dan ditahan pada temperatur kamar selama periode waktu tertentu. Selama penuaan, larutan padat jenuh terurai dan unsur-unsur paduan membentuk *cluster* endapan kecil. Presipitasi (endapan) menghambat pergerakan dislokasi dan akibatnya logam tahan terhadap deformasi dan menjadi lebih keras dan kuat.

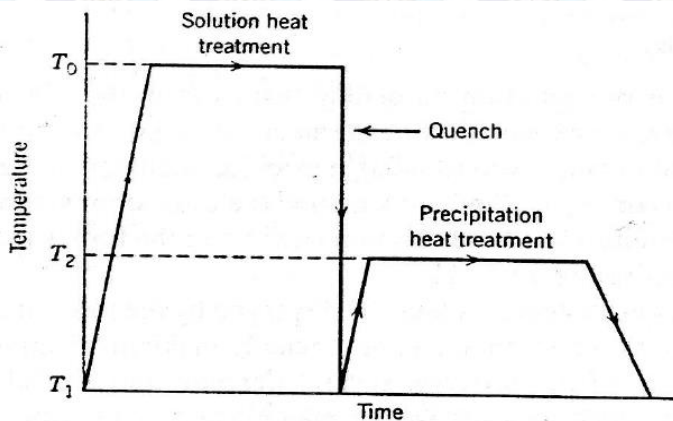
Pengerasan penuaan pada *copper-bearing high strength low alloy* dan *multiphase steels* telah terbukti terjadi pada temperatur berkisar 450-600°C (850-1100 °F) dan telah terbukti meningkatkan kekuatan dan kekerasan hingga 15 - 20 persen (Panwar dkk,2006).

2.7.1 *Solution Treatment*

Solution treatment adalah sebuah proses di mana sebuah paduan atau logam dipanaskan sampai temperatur yang sesuai, diadakan pada temperatur cukup lama untuk memungkinkan konstituen tertentu untuk masuk ke dalam larutan padat, dan kemudian didinginkan dengan cepat untuk menahan konstituen dalam larutan. *Solution treatment* dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan larutan padat yang mendekati homogen (Paryono,2011).

Kemudian diikuti dengan pendinginan cepat *quenching* yaitu dengan mencelupkan ke dalam air atau media pendingin lainnya yang dilakukan pada temperatur rendah untuk memperoleh larutan padat jenuh. Tujuan dilakukan *quenching* adalah agar larutan padat homogen yang terbentuk pada *solution heat treatment* dan kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap pada tempatnya. Pada tahap *quenching* akan menghasilkan larutan padat lewat jenuh (*super saturated solid solution*) yang merupakan fasa tidak stabil pada temperatur biasa atau temperatur ruang. Pada proses

quenching tidak hanya menyebabkan atom terlarut tetap ada dalam larutan, namun juga menyebabkan jumlah kekosongan atom tetap besar. Adanya kekosongan atom dalam jumlah besar dapat membantu proses difusi atom pada temperatur ruang untuk membentuk zona Guinier-Preston (zona GP) yang merupakan kondisi didalam paduan dimana terdapat agregasi atom padat atau pengelompokkan atom padat (Surdia & Saito, 1992).



Gambar 2.5 Mekanisme Proses *Precipitation Hardening*
(Taufiq&Korda, 2010)

2.7.2 *Solid Solution Strengthening*

Penguatan melalui mekanisme larut-padat terjadi akibat adanya atom-atom asing yang larut-padat baik secara substitusi maupun interstisi. Atom asing yang larut-padat tersebut dapat berupa unsur pepadu dalam bentuk paduan maupun inklusi berupa atom pengotor. Kelarutan atom-atom asing ini dalam bentuk larut-padat mengakibatkan timbulnya medan tegangan yang berdampak terhadap pergerakan dislokasi. Pergerakan dislokasi semakin sukar dengan timbulnya medan tegangan

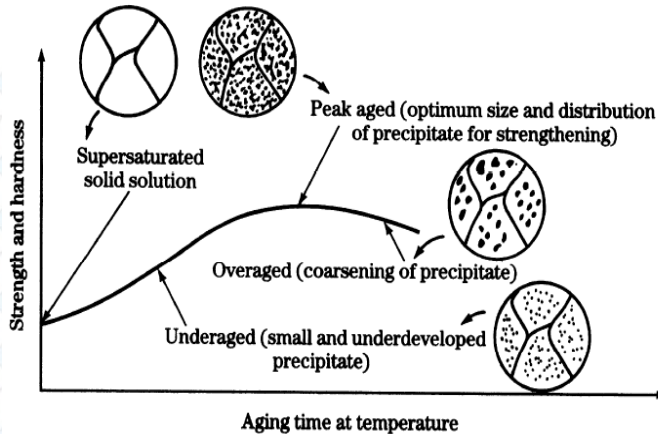
sehingga mengakibatkan logam menjadi lebih kuat atau keras (Suratman,1994).

2.7.3 Penuaan (*Aging*)

Setelah melakukan *solution heat treatment* dan *quenching*, pengerasan paduan dapat dicapai dengan dua cara, yaitu pada saat temperatur kamar (*natural aging*) atau dengan perlakuan panas presipitasi (*artificial aging*). Penuaan pada temperatur kamar akan memakan waktu yang lebih lama, biasanya sekitar 96 jam untuk mencapai kekuatan yang lebih stabil, sedangkan apabila penuaan dilakukan secara *artificial*, maka lamanya penuaan bergantung pada temperatur pemanasan. Semakin tinggi temperaturnya, semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kekuatan tertentu.

Pemilihan penggunaan metode pengerasan paduan bergantung pada jenis paduan yang ingin kita tingkatkan kekerasannya. Untuk paduan yang mempunyai reaksi presipitasi lambat, selalu dilakukan pengendapan pada temperatur di atas temperatur kamar (*artificial aging*), sedangkan untuk yang memiliki reaksi pengendapan cepat cukup dengan melakukan *natural aging* untuk memperoleh sifat mekanik yang diinginkan. Pada saat *aging* terjadi pembentukan dan pertumbuhan inti yang mengarah pada pembentukan presipitat stabil θ . Pembentukan fasa ini terjadi melalui beberapa fasa transisi yang juga mempengaruhi sifat mekanik paduan (Taufiq & Korda, 2010).

Karena jumlah densitas presipitat mengontrol kekerasan bukan ukuran dari tiap partikel, dengan cara menumbuhkan sebanyak mungkin partikel dan menjaganya untuk tetap berkembang. Jika proses anil terlalu lama atau berada pada temperatur yang tinggi, beberapa presipitat akan tumbuh dan lainnya akan menghilang, menurunkan jumlah presipitat dan kekuatannya hal ini disebut dengan *overaging* (Smith, 1993).



Gambar 2.6 Perubahan Strukturmikro Selama Proses *Aging*
(Smith,1993)

2.7.4 Presipitasi (*Precipitate Strengthening*)

Pengerasan logam dapat juga ditingkatkan dengan proses presipitasi yaitu pengerasan melalui partikel endapan fasa kedua yang halus dan menyebar. Distribusi presipitat dalam bentuk partikel endapan fasa kedua ini menimbulkan tegangan dalam (*internal stress*). Tegangan yang ditimbulkan semakin besar sehingga mengakibatkan semakin meningkatnya kekuatan atau kekerasan. Pengerasan presipitasi ini terjadi melalui proses perlakuan panas, *quenching* dan *aging*. Paduan logam dalam bentuk dua fasa atau lebih dipanaskan pada temperatur tertentu sehingga senyawa fasa tersebut akan larut-padat dalam satu fasa yang relatif homogen. Fasa yang relatif homogen tersebut kemudian didinginkan secara cepat sehingga membentuk fasa larut-padat super jenuh. Fasa larut-padat super jenuh tersebut kemudian mengalami *aging* sehingga terbentuk presipitat berupa partikel endapan fasa kedua yang halus dan tersebar merata yang mengakibatkan bahan menjadi keras. Pengerasan presipitasi ini akan menurun kekuatannya bila mengalami temperatur *overaging* (Suratman,1994).

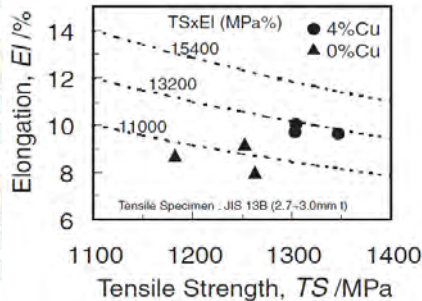
2.8 Penelitian Sebelumnya

2.8.1 Pengaruh Tembaga Dalam Baja Terhadap Kekuatan Tarik , Penghalusan Butir Dan Perilaku Presipitasi

Fenomena presipitasi tembaga dalam besi dan baja telah banyak diketahui dan merupakan potensi untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan menjadi lebih baik dibandingkan dengan baja kekuatan tinggi konvensional lainnya karena presipitasi tembaga berbeda sifatnya dibandingkan dengan presipitasi lain seperti karbida atau nitrida. Telah banyak penelitian yang membahas tentang perilaku pengelompokan dan pengendapan (presipitasi) tembaga dalam besi dan baja serta hubungannya dengan sifat mekanik namun pendalaman lebih jauh dibutuhkan khususnya tentang fenomena *aging* tembaga yang ditambahkan pada masih dirasa kurang. Dalam jurnalnya, Takaki ,dkk(2004) menyatakan bahwa tembaga di dalam Fe memiliki pengaruh yang besar terhadap keseimbangan antara kekuatan dan keuletan dibandingkan sifat serupa pada baja-baja lainnya, hal tersebut terutama dapat terjadi apabila tembaga di dalam Fe berbentuk presipitat. Tembaga akan berkumpul membentuk *clustering* tersendiri di luar butiran, selain itu tembaga mampu berperan sebagai *grain refiner* ferit dalam Fe.

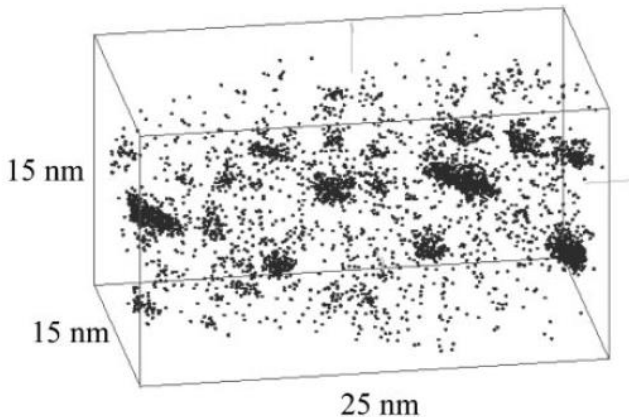
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah menambahkan tembaga kedalam besi murni dalam bentuk molten ingot. Untuk spesimen material Fe-Cu *ferrite vacum molten ingot* tersebut dipanaskan pada temperatur 1150° C dan di *hot rolled* hingga mencapai ketebalan 4 mm. Setelah itu spesimen yang berbentuk lembaran melalui proses *cold rolled* hingga mencapai ketebalan 1 mm serta melalui *solution treatment* pada temperatur 830° C selama 10 menit dengan pendinginan cepat setelah itu spesimen di *aging* pada temperatur 300 hingga 650° C selama 20 menit. Sedangkan untuk spesimen Fe-C-Mn-Cu *martensite* dipanaskan pada temperatur 1050° C kemudian di *hot rolled* setelah itu didinginkan di udara terbuka. Ketebalan yang dicapai adalah 3 mm lalu mengalami proses *solution treatment* pada

950°C selama 30 menit kemudian di *aging* pada temperatur 200 hingga 550° C selama 360 menit.



Gambar 2.7 Hubungan Kesetimbangan Antara *Tensile Strength* dan *Elongation* Terhadap Penambahan Tembaga (Takaki,dkk,2004)

Dari hasil pengujian diketahui bahwa semakin banyak jumlah kadar Tembaga yang ditambahkan maka semakin besar nilai kekuatan tarik dan elongationnya hal tersebut terlihat pada **Gambar 2.7** Keberadaan *clustering* dari tembaga juga dapat diketahui dengan pengujian menggunakan OTAP (*Optical Tomographic Atom-Probe*) , ukuran *cluster* sekitar 1 hingga 4 nm. *Cluster* yang lebih kecil berbentuk *spherical* sedangkan yang lebih besar berbentuk *ellipsoidal*. Disebutkan juga bahwa *Cucluster* berkontribusi dalam penguatan tanpa adanya penurunan keuletan karena *Cucluster* lebih halus dibandingkan dengan karbida . Keberadaan *clustertembaga* terlihat pada **Gambar 2.8** berikut ini :

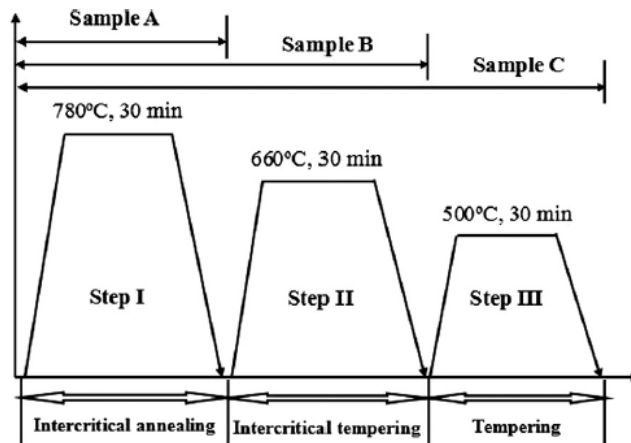


Gambar 2.8 Tembagacluster yang Sudah Diaging Selama 20 Menit pada 450°C dengan Komposisi 4% (Takaki, dkk, 2004)

2.8.2 Presipitasi Tembaga Dan Pengaruhnya Terhadap Sifat Mekanik Baja *Microalloy* Karbon Rendah Dengan Tiga Langkah Perlakuan Panas

Zhou, dkk (2014), dalam jurnalnya menganalisis hubungan antara struktur mikro dan sifat mekanik dengan menitikberatkan pada pengaruh dari proses tempering low carbon Tembaga-bearing steels melalui tiga tahap perlakuan panas yaitu *intercritical annealing*, *intercritical tempering*, dan *tempering*. Presipitasi tembaga terbentuk selama proses aging dikarenakan rendahnya kelarutan tembaga dalam *ferrite*. Sebelumnya, baja dicairkan pada *vacuum induction furnace* dan dicor menjadi ingot seberat 40 kg dan di-*forging* membentuk blok yang selanjutnya akan di-*rolling*. Baja blok dihomogenisasi terlebih dahulu dengan dipanaskan kembali pada 1200°C selama 2 jam. Selanjutnya, blok di-*roll* dengan ketebalan 8 mm melalui *six-passes* dan didinginkan dengan media udara. Struktur mikro dari baja sewaktu di-*roll* berupa bainit dan martensit. Penambahan tembaga pada baja meningkatkan *yield strength* melalui penguatan

presipitasi dan lebih jauh dapat meningkatkan presipitasi selama *aging* pada rentang temperatur 500-550° C.

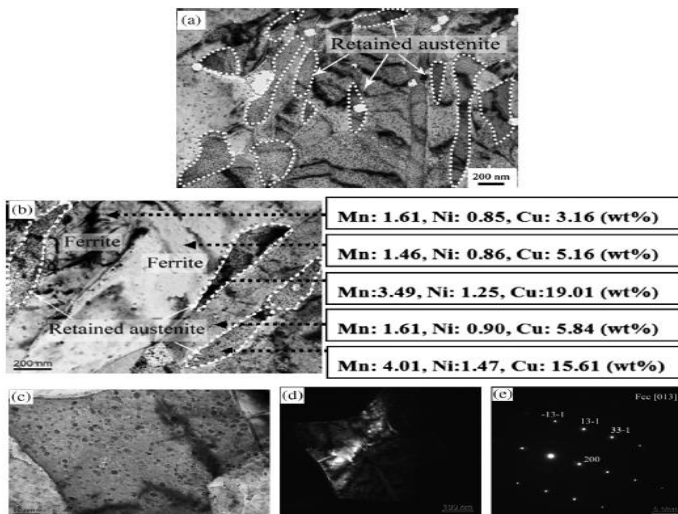


Gambar 2.9 Proses Perlakuan Panas 3 kali dengan Pendinginan Udara (Zhou,dkk,2014)

Dari hasil penelitian diketahui bahwa baja menunjukkan sifat mekanik yang baik yakni *yield strength* sebesar 724 MPa, *tensile strength* 923 MPa, *yield ratio* 0.78, elongasi total 31%. Struktur mikro terdiri dari *ferrite*, austenit sisa dan sejumlah kecil bainit/martensit dengan *ferrite* merupakan fasa yang dominan. Presipitasi tembaga meningkatkan kesetimbangan dari austenit sisa dan berkontribusi pada kekuatan dan pengerasan.

Pada **Gambar 2.10.a** merupakan presipitat dalam austenit sisa ditunjukkan dengan titik putih dan garis putus – putus serta beberapa ferit. Untuk **Gambar 2.10.b** jumlah Mn, Ni dan Cu pada austenit sisa dengan menggunakan EDS sedangkan **Gambar 2.10 c-e** menunjukkan daerah gelap dan terang serta pola difraksi austenit sisa dengan luar mayoritas presipitat. Presipitat tampak lebih homogen dan pada ferit dan bainit terdapat sejumlah kecil presipitat. Dari hasil EDX pun

menunjukkan peningkatan jumlah Cu pada austenit sisa. Tembaga diketahui memiliki kelarutan yang tinggi di dalam austenit. Presipitat tembaga (FCC) terbentuk dari daerah yang kaya Cu selama proses aging dan tumbuh seiring dengan peningkatan waktu aging. Keberadaan tembaga pada austenit sisa disebabkan terjadinya difusi selama proses tempering. Adanya penambahan unsur paduan menyebabkan turunnya temperatur A1 sehingga transformasi terjadi pada temperatur yang lebih rendah pada daerah ini. Hal tersebut menyebabkan tembaga berdifusi dari ferit ke austenit sisa.

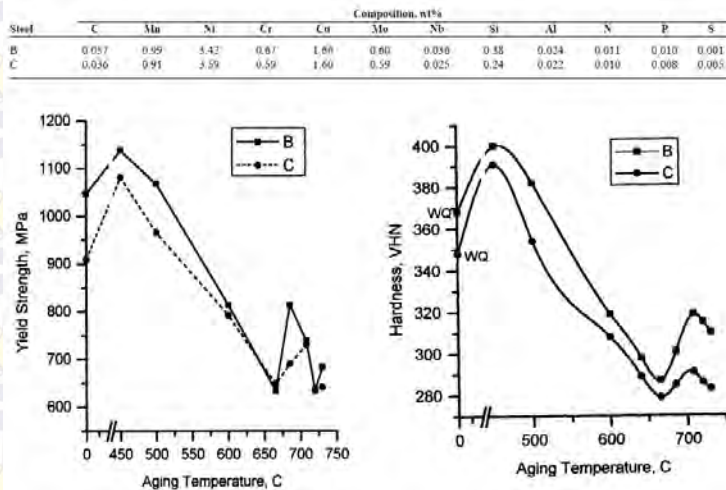


Gambar 2.10 Hasil pengujian TEM (Zhou,dkk,2014)

2.8.3 Baja HSLA-100 : Pengaruh dari Aging HeatTreatment pada Mikrostruktur dan Sifatnya

Penelitian yang dilakukan oleh Mujahid dkk, (1997), ini bertujuan untuk mengembangkan baja HSLA dengan penambahan tembaga, serta pengurangan kadar karbon guna meningkatkan ketangguhan dan mampu las. Material yang

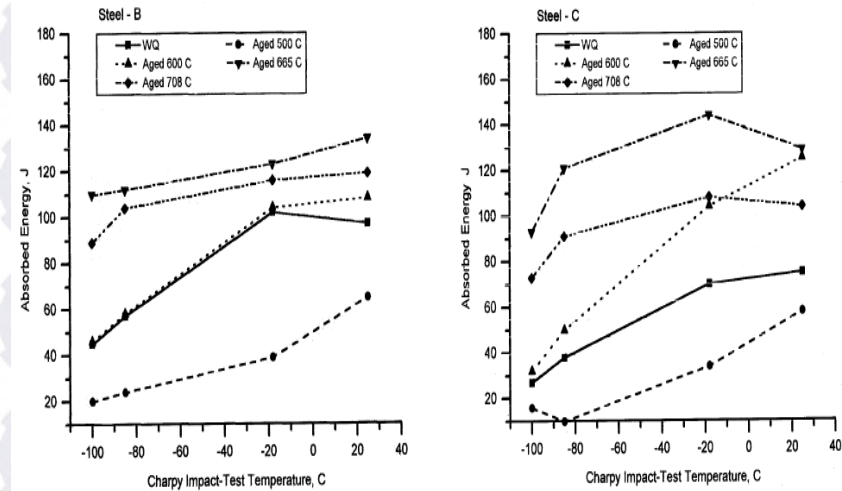
digunakan adalah baja dengan komposisi kadar karbon 0,057% dan 0,036% serta kadar tembaga sebanyak 1,66% dan 1,60% dengan dimensi 102x25x25 mm. Setelah itu material dipanaskan hingga temperatur 900°C selama satu jam kemudian didinginkan secara cepat (*quenching*). Pelat baja tersebut kemudian di-*aging* selama satu jam pada temperatur 450-730°C kemudian didinginkan di udara terbuka. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi uji kekerasan, uji tarik, dan uji impak. Berikut adalah hasil pengujian yang telah didapatkan.



Gambar 2.11 Hasil Pengujian Tarik dan Hardness untuk Material B dan C (Mujahid,dkk, 1997)

Hasil pada **Gambar 2.11** menunjukkan hasil pengujian dengan tren yang sama antara material B dan C. Perilaku *aging* dari baja ini dapat dibagi menjadi empat bagian. Bagian pertama yaitu menunjukkan tingkat kekuatan tertinggi pada temperatur 450°C. Bagian kedua pada range temperatur 450 hingga 665°C dikategorikan sebagai pengurangan kekuatan secara kontinu. Bagian ketiga merupakan kategori *secondary strengthening* pada temperatur 708°C, sedangkan bagian keempat merupakan

kategori pengurangan kekuatan kembali pada temperatur diatas 708°C.



Gambar 2.12 Hasil Pengujian Impak (Mujahid,dkk, 1997)

Gambar diatas menunjukkan energi impak dari baja sebagai fungsi terhadap pengujian temperatur. Hasil pengujian mengindikasikan bahwa baja yang di-aging pada temperatur 450° hingga 500°C menghasilkan ketahanan yang rendah terhadap patahan *brittle*. Namun, ketangguhan meningkat seiring dengan temperatur *aging* yang meningkat diatas 600°C. Kombinasi yang terbaik dari *yield strength* dan ketangguhan berada pada temperatur *aging* 640°C.

2.8.4 Model Baru dari Presipitasi Interfasa Pada Baja yang Mengandung Tembaga

Tembaga ditambahkan pada HSLA salah satunya untuk menyediakan kekuatan oleh presipitasi dari fasa tembaga. Pada penelitian yang dilakukan oleh Thompson (1998), dengan material HSLA-80 dengan kadar tembaga 1,17% Cu dan 0,05% C

yang telah dipanaskan hingga temperatur 1200°C selama 7 hari dalam atmosfer argon. Material kemudian di-*immerse* pada tembaga sulfat untuk meminimalisasi dekarburisasi, setelah itu dipanaskan kembali pada temperatur 905°C dalam atmosfer argon selama 10 menit diikuti dengan pendinginan *quenching*. Langkah tersebut diulang sebanyak tiga kali kemudian dipanaskan kembali pada temperatur 1100°C dengan *holding time* 30 menit Untuk transformasi *isothermal austenite*. Selanjutnya, guna *pre-determined* jumlah waktu, material di-*immerse* dalam *molten tin bath* pada temperatur 500-700°C kemudian di-*water-quench*.

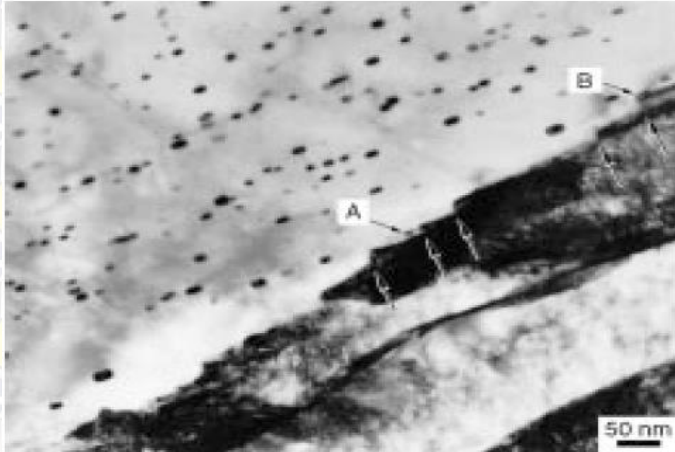
Hasil perlakuan kemudian dilakukan pengujian karakterisasi struktur mikro dengan *Transmission Electron Microscopy* (TEM), didapatkan hasil sebagai berikut.



Gambar 2.13 Transformasi *Isothermal* pada 675°C, *Holding Time* 1000 detik (Thompson, 1998)

Pada **Gambar 2.13** terlihat adanya barisan dari presipitasi FCC ϵ -tembaga yang ditunjukkan oleh label A, serta

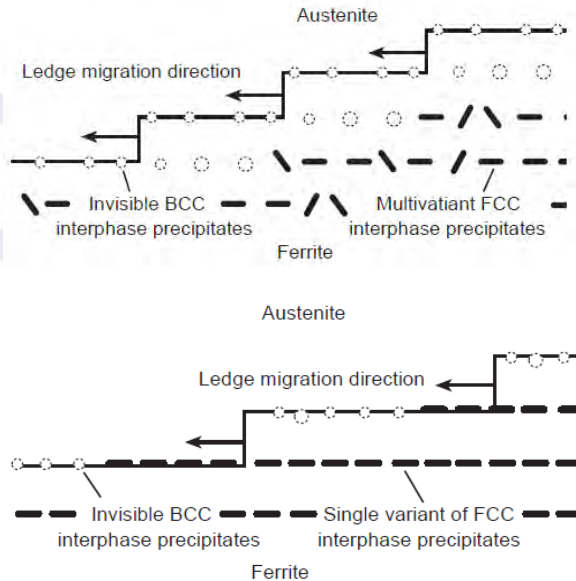
dislokasi matriks yang bebas dari presipitat tembaga. Sisa dari pertumbuhan tepi, yang mana berada pada interfasa ferit/austenit terlihat dengan jelas pada batas butir ferit. Ketinggian tepian sama dengan jarak presipitasi pada kristal poligonal ferit dalam A. Presipitat ini membentuk segment planar dari ferit/austenit interfasa dan nampak seperti suatu barisan.



Gambar 2.14 Transformasi *Isothermal* pada 675°C , *Holding Time* 700 detik (Thompson, 1998)

Berbeda halnya dengan yang ditunjukkan pada **Gambar 2.13**, terlihat bahwa pertumbuhan tepian pada interfasa secara jelas dapat diamati, dan sangat sedikit presipitat yang berdekatan dengan interfasa (A dan B). Presipitat pada **Gambar 2.14** memiliki bentuk yang bervariasi, meskipun barisan presipitat sulit didefinisikan dengan orientasi seperti ini.

Keterbatasan penelitian ini adalah BCC presipitat tembaga sangat sulit untuk teridentifikasi pada TEM. Namun secara spesifik, *atomic scattering factors* untuk tembaga dan besi hampir sama demikian juga dengan struktur kristal dan *lattice parameters*nya sehingga BCC tembaga dapat muncul dengan kristal ferit pada TEM.



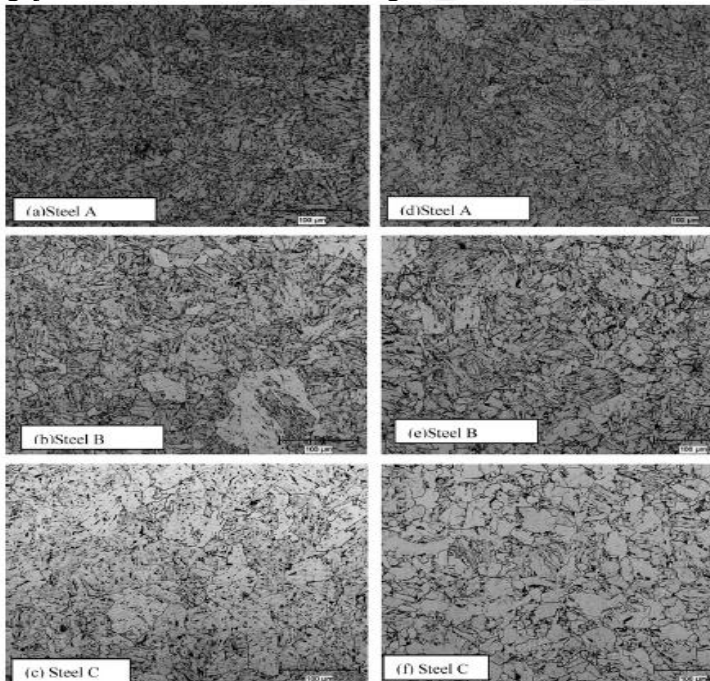
Gambar 2.15 Formasi dari BCC- Tembaga Interfasa Presipitat Sebelum dan Sesudah Transformasi pada Kesetimbangan FCC ϵ -Tembaga pada Interfasa Ferit/Austenit (Thompson, 1998)

Model baru interfasa presipitat baja yang mengandung tembaga telah terbentuk, hal ini dibuktikan dengan fasa transisi BCC presipitat tembaga yang sebelumnya membentuk FCC presipitat tembaga.

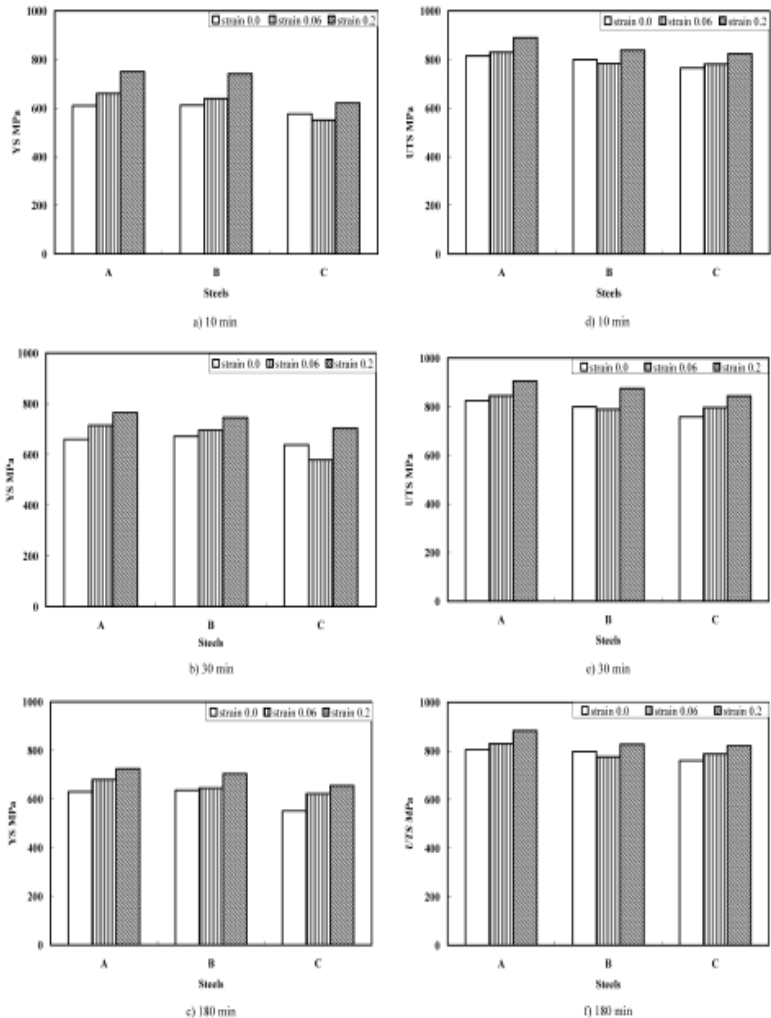
2.8.5 Analisis Pengaruh Tembaga terhadap Mikrostruktur dan Sifat Mekanik pada Baja *Microalloyed*

Mikrostruktur dan sifat mekanik dibawah kondisi *cool deformation* telah diidentifikasi untuk tiga jenis baja yang berbeda yang memiliki kandungan karbon sekitar 0,03% dengan perbedaan penambahan paduan niobium dan tembaga. Penelitian yang dilakukan oleh Elwazri dkk (2007), menggunakan metode yaitu memanaskan ketiga jenis baja pada temperatur 1200°C

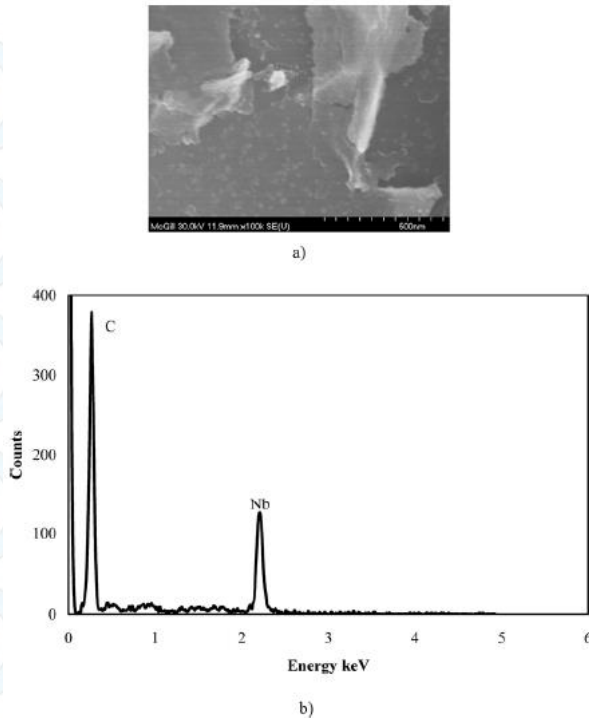
kemudian di-*holding* selama 20 menit untuk memastikan ketidaklarutan secara signifikan dari presipitat Nb pada mikrostruktur awal. Setelah itu spesimen didinginkan hingga mencapai temperatur 400°C dengan *holding time* selama 5 menit untuk homogenisasi temperatur setelah itu dilakukan deformasi kompresif pada regangan antara 0,06 dan 0,2 pada laju regangan konstan diikuti dengan pendinginan udara. Kemudian spesimen dipanaskan kembali pada temperatur 400°C dengan waktu tahan 10 menit hingga 180 menit dengan pendinginan udara. Hasil pengujian dari metode tersebut sebagai berikut.



Gambar 2.16 Hasil Pengamatan Mikroskop Optik Setelah Aging 30 Menit (A,B,C) Hanya Aging (D,E,F) Cool Deformation Pada Regangan 0,2(Elwazri, dkk, 2007)




Gambar 2.17 Variasi Kekuatan Tiga Baja dengan Perlakuan Cool Deformation dan Waktu Aging: (a, b, c) Yield Strength dan (d, e, f) Ultimate Tensile Strength (Elwazri, dkk, 2007).



Gambar 2.18 Analisis Ukuran Presipitat FE-SEM 5 nm: (a) Gambar SE dari Partikel dan (b) EDS *Spectrum* Menunjukkan Puncak Nb(Elwazri, dkk, 2007).

Struktur mikro yang terbentuk adalah granular bainit yang terdiri dari iregular ferit dan fasa kedua berupa perlit atau asikular ferit yang terlihat pada **Gambar 2.16**. Pada spesimen *aging* memiliki ukuran butir sebesar 22, 25, 30 μm untuk baja A, B dan C. Deformasi dingin bertujuan untuk menghasilkan campuran butir halus dan kasar dengan rata-rata ukuran butir 15, 18, 25 μm . Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa deformasi dingin yang dilakukan meningkatkan *yield strength* dan UTS dari

semua baja dibandingkan dengan spesimen yang hanya di-*aging*. Juga dapat diketahui bahwa presipitat yang terbentuk sangat kecil yakni berukuran 3-10 nm. Presipitat tersebut diidentifikasi sebagai NbC, tidak terbentuk presipitat tembaga pada baja seperti yang ditunjukkan **Gambar 2.18**



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

3.1 Bahan dan Alat Penelitian

3.1.1 Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan penelitian yang digunakan sebagai berikut :

1. Baja AISI 1006 (*Dead Mild Steel*)
2. Tembaga Murni
3. Methanol 90%
4. Larutan HNO_3
5. Kawat FerroNickel
6. Kain Beludru
7. *Metal Polish*
8. Katalis
9. Resin /Epoxy
10. Gas Argon
11. Air

3.1.2 Alat Penelitian

1. Gerinda Tangan
Digunakan untuk memotong dan menggerinda spesimen awal baja AISI 1006 (*Dead Mild Steel*) serta spesimen yang telah mengalami proses dalam penelitian.
2. Gergaji Mesin
Digunakan untuk memotong tembaga menjadi dimensi yang lebih kecil untuk kemudian dicairkan.
3. *Crucible* Grafit
Digunakan sebagai wadah dari potongan logam tembaga murni yang akan dicairkan dan wadah proses *copperizing* dalam furnace.
4. *Muffle Furnace*
Alat ini digunakan untuk melakukan pemanasan awal (*pre-heat*) spesimen baja AISI 1006 (*Dead Mild Steel*) yang telah disiapkan serta proses *precipitation*

hardening spesimen yang telah melalui proses *copperizing*

5. Kertas Gosok (Ampelas)

Digunakan untuk proses *grinding* spesimen baja AISI 1006 (*Dead Mild Steel*) hasil penelitian sebagai preparasi uji struktur mikro.

6. *Cutting tool*

Digunakan untuk memotong tembaga murni, sampel awal (baja AISI 1006), dan hasil *copperizing* untuk pengujian metalografi, kekerasan, SEM/EDX, XRD dan EOS.

7. Bor Duduk

Digunakan untuk melubangi spesimen baja AISI 1006 (*Dead Mild Steel*) yang akan melalui proses *copperizing* sebagai pengait kawat baja.

8. Penjepit Logam

Digunakan untuk mengambil specimen baja AISI 1006 (*Dead Mild Steel*) yang dicelupkan dalam tembaga pada saat proses *copperizing* dan *precipitation hardening*.

9. Alat Kikir

Alat kikir ini digunakan untuk meratakan permukaan spesimen baja AISI 1006 (*Dead Mild Steel*) sebelum dilakukan pengamplasan.

10. Ember

Digunakan sebagai wadah air saat proses *water quench*.

11. Pipa Shok

Digunakan sebagai cetakan sampel uji metalografi saat *mounting*.

12. Tang

Digunakan untuk membengkokkan kawat saat akan diikatkan ke sampel dan memegangi sampel ketika dibor.

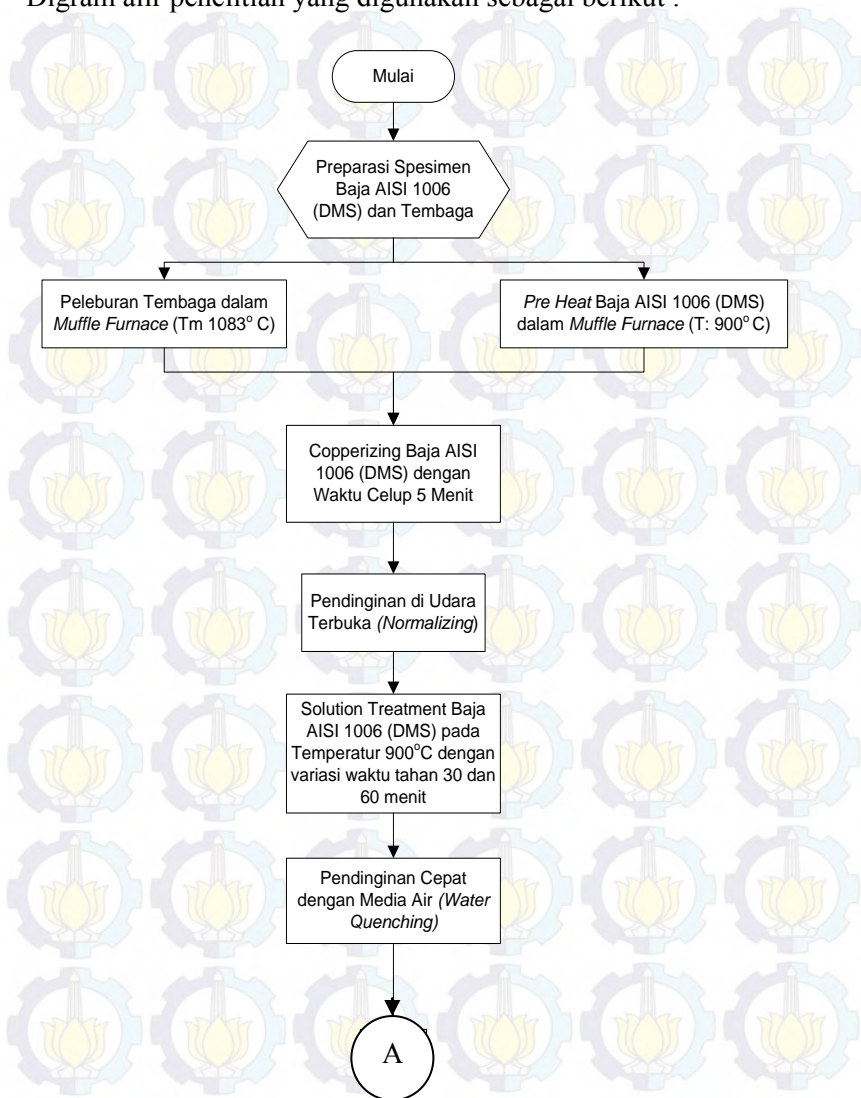
13. Mesin *Polishing*

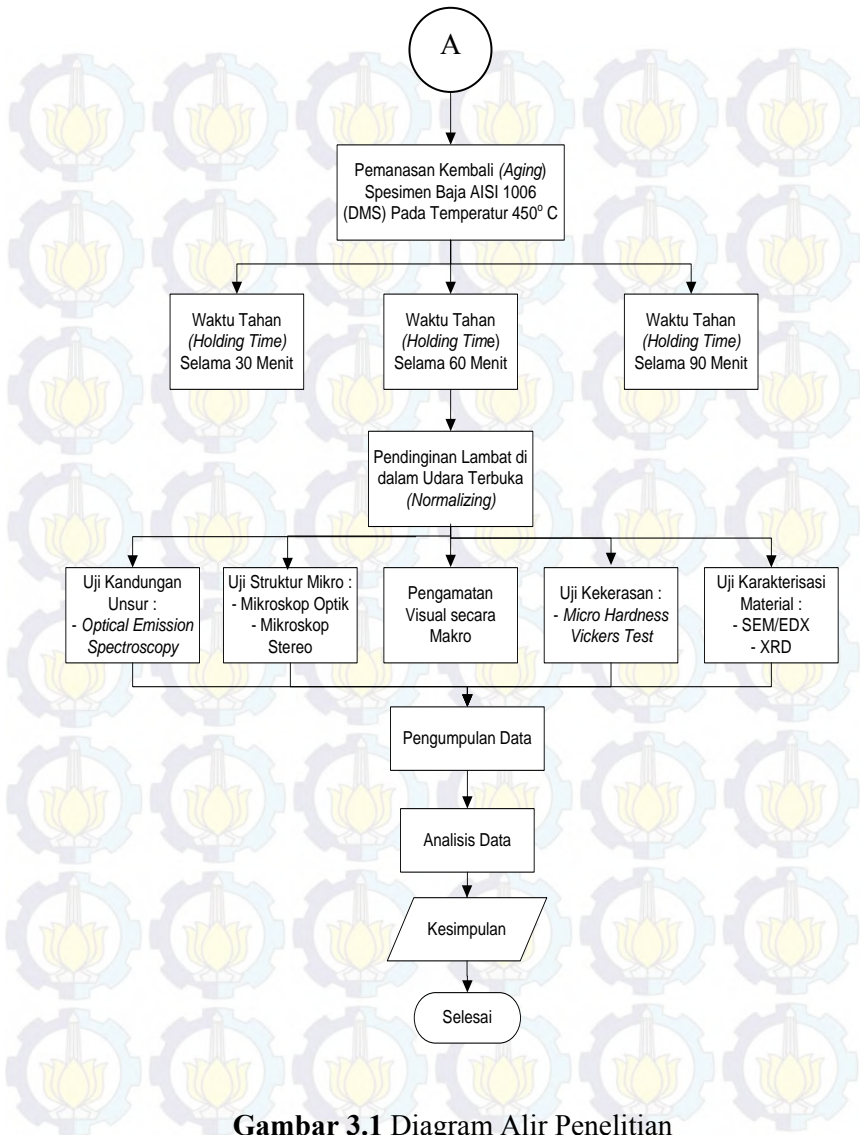
Digunakan untuk menghaluskan permukaan logam setelah proses *grinding* guna menghilangkan *scratch* yang ada di permukaan logam yang tidak dapat dihilangkan dengan kertas gosok (ampelas)

14. Alat Uji *Microindentation Hardness* Vickers
Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari spesimen kontrol dan sampel hasil proses penelitian.
15. Alat Uji *Scanning Electron Microscopy* (SEM)
Digunakan untuk mengetahui morfologi dan kristalografi serta kedalaman kadar tembaga dari spesimen uji.
16. Alat Uji *X-ray Diffraction*
Digunakan untuk mengetahui fasa atau senyawa yang terbentuk pada spesimen uji setelah melalui proses percobaan
17. Mikroskop Optik dan Mikroskop Stereo
Digunakan untuk mengetahui struktur mikro dari spesimen uji.
18. Alat Uji *Optical Emission Spectroscopy* (OES)
Digunakan untuk mengetahui presentase komposisi unsur dari spesimen uji.

3.2 Diagram Alir

Diagram alir penelitian yang digunakan sebagai berikut :





3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi Sampel Awal

Preparasi sampel meliputi pemotongan baja AISI 1006 untuk *copperizing* dan spesimen kontrol. Sampel untuk *copperizing* dipotong dengan dimensi 90x30x3 mm, salah satu ujungnya dilubangi dengan bor duduk sebagai lubang pengait dari kawat *ferronickel*, dan permukaannya dibersihkan dengan kertas amplas hingga tidak ada kerak dan karat yang tertinggal. Spesimen kontrol dipotong untuk pengujian struktur mikro, kekerasan, dan *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

3.3.1.a Pengujian Spesimen Kontrol 1

Untuk mengetahui kondisi awal sampel sebelum dilakukan *copperizing* dilakukan pengujian visual makro, struktur mikro, kekerasan, dan *Optical Emission Spectroscopy* (OES).

a. Pengamatan Makro

Pengamatan spesimen secara makro dilakukan dengan mengambil foto spesimen menggunakan Kamera Canon DSLR EOS 70D. Tujuannya untuk mengetahui gambar permukaan dan penampang melintang spesimen pada skala makro.

b. Uji struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik Olympus BX51M-RF di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui struktur mikro dari sampel sebelum di-*copperizing* dan selanjutnya dilakukan perhitungan ukuran butir rata-rata sesuai dengan ASTM E112. Etas yang dipakai yaitu nital yang terdiri dari larutan methanol dan HNO_3 .

c. Uji kekerasan yang dipakai adalah Vickers *microhardness* dengan indenter piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan 136° , terbuat dari intan sesuai dengan ASTM E384. Tujuannya untuk mengetahui kekerasan dari sampel sebelum di-*copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan

Teknik Material dan Metalurgi ITS menggunakan *Microhardness Tester Wilson 402 MVD*.

- d. Uji *Optical Emission Spectroscopy* (EOS) dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur penyusun baja AISI 1006. Pengujian dilakukan di Laboratorium DT & NDT , Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya menggunakan alat Foundry-Master Pro.

3.3.2 Proses *Copperizing*

3.3.2.a Proses Peleburan Tembaga

Proses peleburan tembaga melibatkan pencairan tembaga murni dalam jumlah yang Tembaga cukup banyak. Setelah tembaga dipotong menggunakan gergaji mesin menjadi potongan-potongan kecil dengan dimensi yang sembarang. Digunakan sekitar 1,5 kg tembaga murni tiap proses *copperizing* dilakukan. Potongan tembaga tersebut kemudian dimasukkan ke dalam *crucible* graphite berdimensi 97x79x56 mm yang akan digunakan sebagai wadah untuk meleburkan tembaga dalam *muffle furnace* hingga titik lebur tembaga yaitu 1083°C.

3.3.2.b Pemanasan Baja AISI 1006(Dead Mild Steel)

Selama proses peleburan tembaga berlangsung, sampel baja AISI 1006 (Dead Mild Steel) yang telah dipreparasi kemudian dipanaskan. Baja AISI 1006 dipanaskan pada temperatur 900 °C di dalam *muffle furnace*. *Holding time* dari keseluruhan sampel uji di dalam *muffle furnace* kurang lebih selama 1 jam.

3.3.2.c Proses Pencelupan Baja dalam Tembaga Cair

Proses *copperizing* diawali dengan proses peleburan tembaga di dalam *muffle furnace* pada temperatur *meltingnya* sekitar 1083° C. Setelah tembaga menjadi cair , sampel baja AISI 1006 dikeluarkan satu per satu dari *muffle furnace* yang lain untuk dilakukan proses pencelupan tembaga cair(*copperizing*) dalam wadah *crucible graphite*. Lama waktu pencelupan yaitu

kurang lebih selama 5 menit untuk masing-masing sampel. Setelah mencapai waktu pencelupan yang ditentukan, spesimen yang sudah melalui proses pencelupan kemudian diangkat menggunakan penjepit logam untuk didinginkan pada udara terbuka atau *normalizing*.

3.3.2.d. Pengujian Spesimen Kontrol 2

Untuk mengetahui kondisi sampel setelah dilakukan *copperizing* dilakukan pengujian struktur mikro, kekerasan, *Optical Emission Spectroscopy* (OES), SEM/EDX, dan XRD.

a. Pengamatan Makro

Pengamatan spesimen secara makro dilakukan dengan mengambil foto spesimen menggunakan Kamera Canon DSLR EOS 70D dan Mikroskop Stereo Carl Zeiss Stemi DV4. Tujuannya untuk mengetahui gambar permukaan dan penampang melintang spesimen pada skala makro serta mengamati perubahan yang terjadi setelah proses *copperizing*.

b. Uji struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik Olympus BX51M-RF di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui struktur mikro dari sampel setelah di-*copperizing* dan selanjutnya dilakukan perhitungan ukuran butir rata-rata sesuai dengan ASTM E112. Etsa yang dipakai yaitu nital yang terdiri dari larutan methanol dan HNO_3 .

c. Uji kekerasan yang dipakai adalah Vickers *microhardness* dengan indenter piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan 136° , terbuat dari intan sesuai dengan ASTM E384. Tujuannya untuk mengetahui kekerasan dari sampel sebelum di-*copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS menggunakan *Microhardness Tester* Wilson 402 MVD.

d. Uji *Optical Emission Spectroscopy* (EOS) dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur penyusun baja AISI 1006 hasil *copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium DT &

NDT, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya menggunakan alat Foundry-Master Pro.

- e. Pengujian SEM/EDX dilakukan dengan *Scanning Electron Microscope* tipe FEI INSPECT S50 di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui topografi permukaan sampel setelah *copperizing* dan persebaran tembaga. Pengujian EDX dilakukan untuk mengetahui presentase tembaga yang ada pada sampel setelah *copperizing*.
- f. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dengan tipe PANalytical X'Pert PRO MPD dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk setelah proses *copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITS.

3.3.3 Proses *Precipitation Hardening*

3.3.3.a. *Solution Heat Treatment*

Setelah didinginkan di udara terbuka (*normalized*) , sampel baja AISI 1006 (Dead Mild Steel) yang telah melalui proses *copperizing* kemudian dipanaskan kembali dengan temperatur 900°C dimana struktur logam adalah α kemudian dilakukan pendinginan secara cepat dengan media air (*water quenching*) dengan variasi waktu tahan (*holding time*) yaitu 30 dan 60 menit .

3.3.3.b. *Aging*

Setelah itu perlakuan panas presipitasi (*artificial aging*) di dalam *muffle furnace* dengan temperatur pemanasan sekitar 450° C , dengan variasi waktu tahan (*holding time*) yaitu 30, 60 dan 90 menit. Setelah itu sampel dikeluarkan dari *muffle furnace* untuk kemudian dilakukan pendinginan pada udara terbuka (*normalizing*).

3.3.3.c. Pengujian Sampel Akhir

Untuk mengetahui kondisi sampel setelah dilakukan *copperizing* dilakukan pengujian struktur mikro, kekerasan, *Optical Emission Spectroscopy* (OES), SEM/EDX, dan XRD.

a. Pengamatan Makro

Pengamatan spesimen secara makro dilakukan dengan mengambil foto spesimen menggunakan Kamera Canon DSLR EOS 70D. Tujuannya ntuk mengetahui gambar permukaan danpenampang melintang spesimen pada skala makro serta mengamati perubahan yang terjadi setelah proses *copperizing* dan *precipitation hardening*.

b. Uji struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik Olympus BX51M-RF di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui struktur mikro dari sampel setelah di-*copperizing* dan selanjutnya dilakukan perhitungan ukuran butir rata-rata sesuai dengan ASTM E112. Etsa yang dipakai yaitu nital yang terdiri dari larutan methanol dan HNO_3 .

c. Uji kekerasan yang dipakai adalah Vickers *microhardness* dengan indenter piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan 136° , terbuat dari intansesuai dengan ASTM E384. Tujuannya untuk mengetahui kekerasan dari sampel sebelum di-*copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS menggunakan *Microhardness Tester* Wilson 402 MVD.

d. Uji *Optical Emission Spectroscopy* (EOS) dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur penyusun baja AISI 1006 hasil *copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium DT & NDT, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya menggunakan alat Foundry Master Pro.

e. Pengujian SEM/EDX dilakukan dengan *Scanning Electron Microscope* tipe FEI INSPECT S50 di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITSTujuan dari pengujian ini untuk mengetahui topografi

permukaan sampel setelah *copperizing* dan persebaran tembaga. Pengujian EDX dilakukan untuk mengetahui presentase tembaga yang ada pada sampel setelah *copperizing* dan *precipitation hardening*.

- f. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dengan tipe PANalytical X'Pert PRO MPD dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk setelah proses *copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITS.

3.3.4 Analisis Hasil Pengujian

Setelah proses *copperizing* dan aging dilakukan pada sampel baja AISI 1006 (Dead Mild Steel) kemudian dilakukan beberapa pengamatan dan pengujian terhadap spesimen hasil pemaduan tersebut, beberapa pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

a. Analisis Secara Makro

Analisis secara makro ini dilakukan untuk mengamati perubahan keadaan sampel sebelum dan sesudah perlakuan. Tiap spesimen hasil pemaduan dari proses *copperizing* difoto dengan menggunakan kamera digital Canon DSLR EOS 70D dan Mikroskop Stereo Carl Zeiss Stemi DV4. Pengambilan foto dilakukan untuk spesimen pada permukaan dan penampang melintang.

b. Analisis Struktur Mikro

Analisis struktur mikro merupakan metode pengujian untuk melihat struktur logam pada skala mikro. Untuk pengamatan struktur mikro, diambil penampang melintang dari spesimen hasil pemaduan yang telah disiapkan. Potongan spesimen kemudian *dimounting*, dan melalui proses *grinding* dan *polishing* hingga siap untuk dilakukan pengamatan. Pengujian dilakukan menggunakan mikroskop optik di Laboratorium Metalurgi dengan mikroskop optik Olympus BX51M-RF. Etas yang digunakan adalah larutan nital sesuai dengan ASM Metal Handbook Volume 09 untuk

mengetahui mikrostruktur permukaan pada penampang melintang sampel hasil percobaan.

c. Analisis Hasil Pengujian SEM/EDX

Untuk pengamatan morfologi dari permukaan sampel baja AISI 1006 (*Dead Mild Steel*) hasil *copperising* dilakukan pengamatan menggunakan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) tipe FEI INSPECT S50 di Laboratorium Karakterisasi Material. Pengujian ini dilakukan pada spesimen yang sudah di etsa pada pengujian dengan mikroskop optik. Hal ini dilakukan untuk menganalisis dan mengidentifikasi fasa yang terbentuk, mengetahui topografi sampel, ada atau tidaknya tembaga yang berdifusi ke dalam baja, mengetahui presentase banyaknya tembaga pada baja dan mengetahui persebaran dari tembaga.

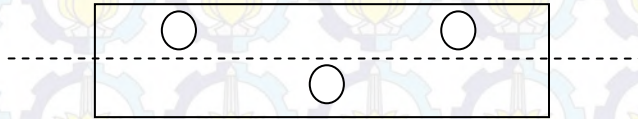
d. Analisis Hasil Pengujian XRD

Untuk pengamatan karakterisasi material selanjutnya dilakukan pengujian sampel AISI 1006 (*Dead Mild Steel*) dengan menggunakan alat *X-ray Diffraction* (XRD) dengan PANalytical X'Pert PRO MPD di Laboratorium Karakterisasi Material untuk mengidentifikasi unsur tunggal atau senyawa yang terbentuk dan menentukan kandungan komposisi atau fasa dalam sampel setelah melalui proses penelitian.

e. Analisis Hasil Pengujian Kekerasan

Untuk mengetahui kekerasan dari penampang melintang sampel baja AISI 1006 (*Dead Mild Steel*) hasil *copperising* maka dilakukan pengujian kekerasan. Spesimen yang akan diuji tersebut kemudian dipotong dan diambil penampang melintangnya untuk diuji kekerasannya di beberapa titik sepanjang penampang. Standart pengujian dengan menggunakan microindentation hardness vickers sesuai dengan ASTM E 384. Indentor yang digunakan adalah intan berbentuk piramida dengan sudut puncak 136° dengan waktu indentasi 10-15 detik. Pengujian kekerasan dilakukan


di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS menggunakan *Microhardness Tester Wilson 402 MVD*.



Gambar 3.2 Skema Pengambilan Nilai Kekerasan

f. Analisis Hasil Pengujian *Optical Emission Spectroscopy*

Untuk mengetahui prosentase kandungan unsur yang berada pada spesimen Baja AISI 1006 (*Dead Mild Steel*) setelah mengalami proses *copperizing* dan *aging*. Spesimen yang akan diuji tersebut kemudian digosok dengan menggunakan kertas ampelas *grade 120* untuk menghilangkan karat dan membersihkan spesimen dari sisa-sisa perlakuan. Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES) ini dilakukan di Laboratorium DT & NDT , Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya menggunakan alat Foundry Master Pro.



(halaman ini sengaja dikosongkan)

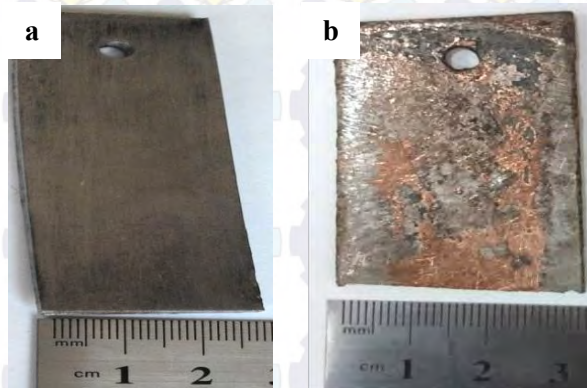
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

4.1.1 Pengamatan Visual Makro

Pengamatan spesimen secara makro dilakukan dengan mengambil foto hasil pematuan *copperizing* dan *precipitation hardening* secara keseluruhan dan *cross – sectional*. Pengamatan makro dilakukan secara visual mata. Berikut akan disajikan hasil foto spesimen yang diambil dengan kamera digital Canon DSLR EOS 70D

4.1.1.a Pengamatan Visual Makro Permukaan Spesimen

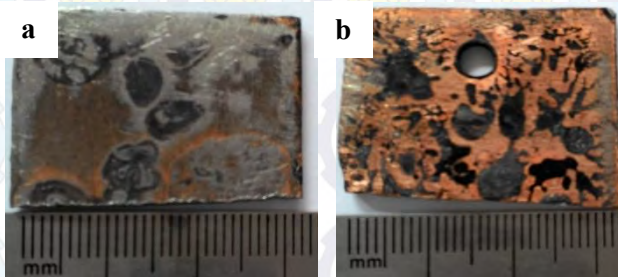


Gambar 4.1 Hasil Foto Permukaan Spesimen (a) Tanpa Perlakuan dan (b) *Copperizing* 5 Menit

Berdasarkan **Gambar 4.1**, terlihat adanya perbedaan yang signifikan terhadap penampakan permukaan spesimen. Hal ini dapat diamati dengan perbedaan adanya lapisan tembaga pada permukaan spesimen sebelum dan sesudah proses *copperizing*. Selain adanya lapisan tembaga pada permukaan spesimen, juga didapatkan lapisan oksida mudah terkelupas yang berwarna hitam pada permukaan spesimen. Namun lapisan oksida tersebut

menjadi tidak tampak karena proses *grinding* yang telah dilakukan, hanya menyisakan bagian sedikit kerak berwarna hitam pada permukaan yang sulit untuk dibersihkan.

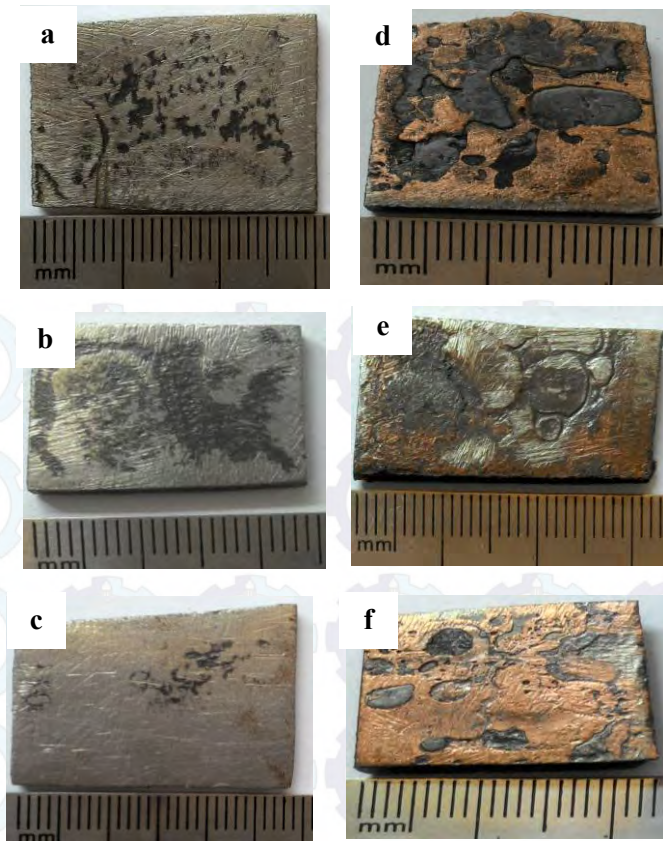
Lapisan tembaga yang terdapat pada permukaan spesimen menyebar secara merata, baik di tepi maupun tengah spesimen. Hal tersebut mengindikasikan bahwa spesimen baja AISI 1006 tercelup sempurna kedalam tembaga cair.



Gambar 4. 2 Hasil FotoPermukaan Spesimen Perlakuan *Solution Treatment* 900°C Waktu Tahan (a) 30 Menit dan (b) 60 Menit

Pada **Gambar 4.2** menunjukkan tampak permukaan spesimen *copperized*-AISI 1006 yang telah melalui proses *solution treatment*. Dapat kita amati bahwa pada foto spesimen yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.2.(a)** lapisan tembaga yang menempel mulai berkurang dan persebarannya yang tidak merata. Berbeda dengan yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.2.(b)** bahwa spesimen *copperized*-AISI 1006 masih nampak dengan jelas lapisan tembaga yang menempel pada permukaannya serta menyebar secara merata. Kedua foto pada **Gambar 4.2** sama-sama menunjukkan adanya bagian berwarna hitam pada permukaan yang merupakan lapisan oksida yang terbentuk akibat proses perlakuan panas, lapisan tersebut keras sehingga sulit dihilangkan meski proses *grinding* telah dilakukan.

Dapat dilihat pada **Gambar 4.3** penampakan permukaan spesimen *copperized*-AISI 1006 setelah *aging* sebagai berikut.



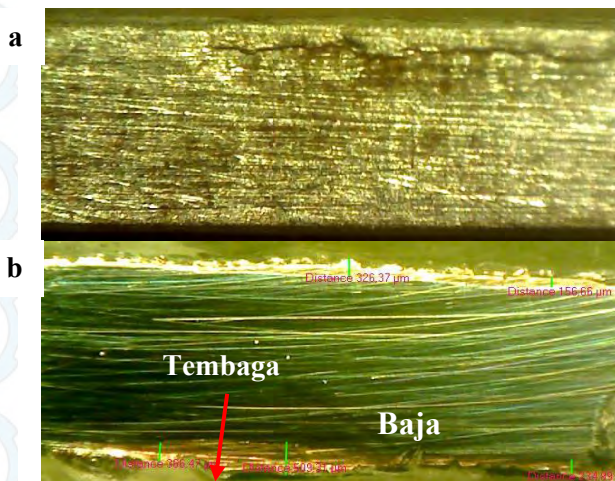
Gambar 4.3 Hasil FotoPermukaan Spesimen *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan dengan (a;b;c) 30 Menit dan (d;e;f) 60 Menit diikuti *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan (a;d) 30 Menit, (b;e) 60 Menit dan (c;f) 90 Menit

Pada **Gambar 4.3.(a;b;c)** spesimen dengan perlakuan *solution treatment* 30 menit diikuti *aging* 30 menit terlihat bahwa lapisan tembaga di permukaan spesimen tampak hilang karena

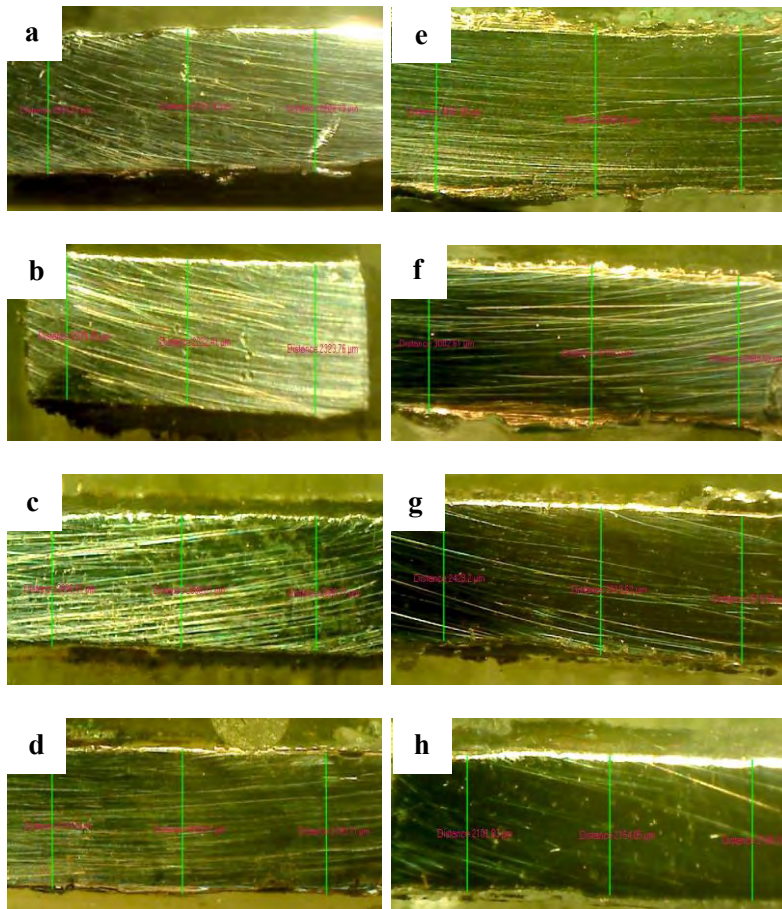
proses *grinding* yang dilakukan, namun masih sedikit terlihat adanya warna coklat kekuningan pada **Gambar 4.3.a**. Bercak warna hitam yang nampak merupakan bekas lapisan oksida yang sulit dihilangkan. Lain halnya dengan yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.3.(d;e;f)** lapisan tembaga pada permukaan masih terlihat jelas meskipun telah melalui proses *grinding*. Lapisan tembaga pada permukaan spesimen setelah *aging* lebih sedikit dan tidak merata dibandingkan setelah proses *solution treatment*.

4.1.1.b Pengamatan Visual Makro Penampang Melintang

Pada **Gambar 4.4** memperlihatkan bahwa adanya perbedaan pada bagian tepi spesimen sebelum dan sesudah *copperizing*. Terlihat adanya lapisan tipis tembaga, hal ini dapat dibedakan dari perbedaan warna antara tembaga yang berwarna kuning kecoklatan, dan spesimen baja AISI 1006 yang berwarna keabu-abuan pada penampang melintang spesimen. **Gambar 4.4 dan 4.5** diambil menggunakan Mikroskop Optik Stereo Carl Zeiss Stemi DV4 dengan perbesaran 8x.



Gambar 4.4 Hasil Foto Penampang Melintang Spesimen (a) Tanpa Perlakuan dan (b) *Copperizing* 5 Menit



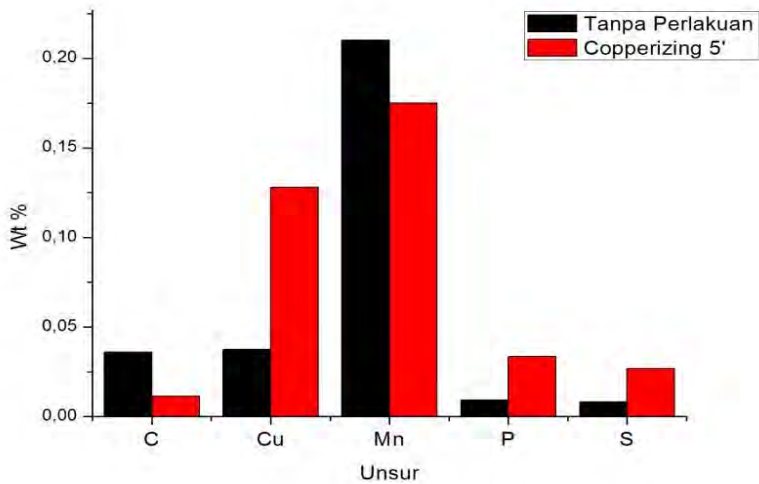
Gambar 4.5 Hasil Foto Penampang Melintang Perlakuan *Solution Treatment* 900°C, dengan Waktu Tahan(a)30 Menit , (e) 60 Menit dan Perlakuan *Aging* 450°C , dengan Waktu Tahan (b;f) 30 Menit , (c;g) 60 dan (d;h) 90 Menit

Berdasarkan **Gambar 4.5** dapat diamati hasil foto penampang melintang spesimen setelah proses *copperizing* dan *precipitation hardening*, terlihat pada hampir semua spesimen dengan variasi waktu tahan baik *solution treatment* dan *aging*, bagian dalam spesimen tidak terlapisi oleh tembaga, namun terlihat adanya lapisan tipis tembaga pada sisi tepi yang melekat pada spesimen baja AISI 1006. Keberadaan lapisan tipis tembaga untuk beberapa spesimen tidak terlihat jelas. Ketebalan lapisan tipis tembaga ini pun beragam tiap spesimen meskipun lama pencelupannya sama yakni 5 menit. Pengaruh proses *copperizing* dan *precipitation hardening* baja AISI 1006 tidak hanya terlihat secara visual, namun juga ada perubahan dengan struktur mikro yang terbentuk akibat proses perlakuan.

4.1.2 Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

Pengujian komposisi kimia spesimen awal sebelum dan sesudah *copperizing* dengan waktu *immerse* 5 menit dilakukan dengan menggunakan *Optical Electron Spectrometry* (OES). Pada hasil uji OES yang dilakukan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dengan menggunakan alat *Foundry Master Pro*, didapatkan perbandingan data antara komposisi spesimen sebelum dengan sesudah *copperizing* yang tersaji dalam **Gambar 4.6**.

Pada spesimen hasil *copperizing* terjadi kenaikan pada komposisi tembaga sebesar 0,0905%. Hal ini menunjukkan bahwa tembaga cair dapat masuk kedalam substrat baja AISI 1006 meski pertambahan kadar tembaga relatif sangat kecil. *Preheat* pada temperatur 900°C yang dilakukan pada sampel baja AISI 1006 sebelum pencelupan kedalam tembaga cair (*copperizing*) memungkinkan untuk tembaga cair masuk kedalam substrat baja karena atom Fe yang berikatan menjadi lebih longgar akibat *preheat* tersebut, selain itu temperatur *preheat* baja yang mendekati titik lebur tembaga yakni 1083°C semakin memudahkan proses masuknya tembaga kedalam substrat baja.



Gambar 4.6 Hasil Pengujian Komposisi Unsur Spesimen Sebelum dan Sesudah *Copperizing*

Selain perubahan penambahan kadar Cu pada spesimen *copperized*-AISI 1006, juga terjadi penurunan kadar karbon (C). Jumlah kadar karbon yang turun masih dalam kategori baja AISI 1006 yang memiliki kandungan karbon max 0,08% sehingga tidak berpengaruh secara signifikan. Hal ini juga berlaku untuk unsur Mangan, Sulfur, dan Fosfor dimana jumlah komposisinya masih dalam spesifikasi baja AISI 1006.

4.1.3 Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM)/EDX

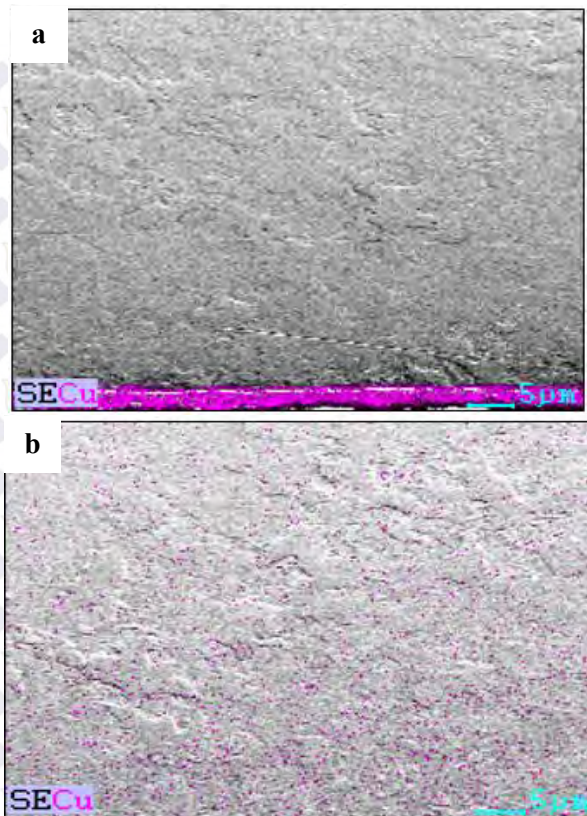
Pengujian dengan SEM/EDX ini dilakukan agar dapat mengidentifikasi morfologi, topografi spesimen lebih lanjut dan persebaran tembaga serta komposisi unsur yang terkandung didalamnya dengan menggunakan EDX. Pengamatan dilakukan di Divisi Karakterisasi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS dengan menggunakan alat SEM FEI INSPECT S50.

4.1.3.a Perbandingan Hasil SEM/EDX Variasi Waktu Tahan *Solution Treatment*

1.) Hasil Pengujian Mapping Tembaga dan EDX *Solution Treatment Waktu Tahan 30 Menit*

Terlihat bahwa pada **Gambar 4.14** kandungan tembaga pada titik di daerah tepi dan tengah untuk parameter *solution treatment* waktu tahan 30 menit, jumlah kandungan tembaga berbeda. Dibuktikan dari proses *mapping* yang ada pada **Gambar 4.7.(a) dan (b)** dimana titik berwarna ungu menunjukkan posisi *cluster* dari tembaga. Dapat dilihat bahwa persebaran tembaga di daerah tepi lebih banyak dibandingkan pada bagian tengah spesimen. Terdapat penumpukan *cluster* tembaga di daerah tepi namun konsentrasi tembaga makin menyebar merata di bagian tengah spesimen.

Persebaran tembaga pada spesimen tengah untuk parameter *solution treatment* waktu tahan 30 menit cenderung berada pada batas butir daripada berada di tengah butir *ferrite*, dilihat dari lebih banyaknya titik ungu yang berada pada garis batas butir yang terlihat pada **Gambar 4.7.b**. Sedangkan pada **Gambar 4.7.a** terlihat adanya penumpukan Cu yang menandakan adanya lapisan tembaga pada bagian luar baja AISI 1006 sesuai dengan pengamatan visual makro.



Gambar 4.7 Hasil *Mapping* Tembaga Spesimen *Solution Treatment* 30 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah

Hasil pengujian EDX menunjukkan adanya perbedaan kadar Cu pada bagian tepi dan bagian tengah, terlihat oleh **Tabel 4.1** berikut.

Tabel 4.1 Hasil EDX untuk *Solution Treatment* 30 Menit

Unsur	Wt %	
	Tepi	Tengah
C	2,03	1,6
O	1,66	1,39
Al	1,07	0,54
Fe	92,49	95,1
Cu	2,75	1,37

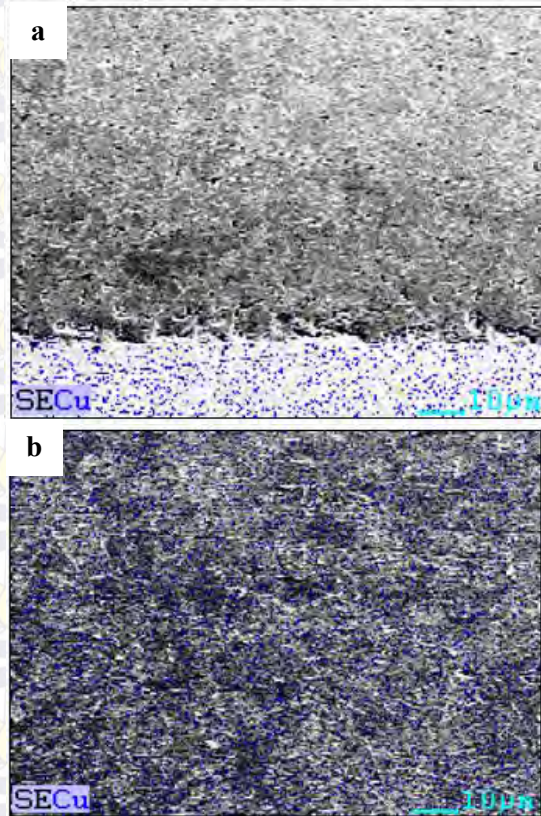
Komposisi unsur tembaga pada bagian tepi lebih banyak daripada bagian tengah spesimen yakni mencapai 2,75%. Adanya unsur O (oksigen) yang terdeteksi dikarenakan kemungkinan adanya kontak dengan lingkungan luar saat dilakukannya perlakuan panas. Sedangkan unsur yang banyak terkandung didalam spesimen adalah Fe yang mencapai lebih dari 92% , dimana Fe merupakan unsur yang dominan.

2.) Hasil Pengujian Mapping Tembaga dan EDX *Solution Treatment* Waktu Tahan 60 Menit

Dapat diamati pada **Gambar 4.8** jumlah kandungan tembaga di daerah tepi dan tengah untuk parameter *solution treatment* waktu tahan 60 menit memiliki perbedaan. Dibuktikan dari proses *mapping* yang ada pada **Gambar 4.8.(a) dan (b)** yang mana titik berwarna biru menunjukkan posisi *cluster* dari tembaga. Diketahui bahwa persebaran tembaga di daerah tepi lebih banyak dimiliki dibandingkan pada bagian tengah spesimen. Terjadi penumpukan *cluster* tembaga di daerah tepi namun konsentrasi *cluster* tembaga di bagian tengah spesimen makin tersebar secara merata.

Cluster tembaga cenderung berada di batas butir daripada berada di tengah butir *ferrite* pada bagian tengah spesimen untuk parameter *solution treatment* waktu tahan 60 menit, dilihat dari

lebih banyaknya titik biru yang berada pada garis batas butir yang berwarna putih yang terlihat pada **Gambar 4.8.b**



Gambar 4.8 Hasil *Mapping* Tembaga Spesimen *Solution Treatment* 60 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah

Komposisi unsur tembaga pada bagian tepi lebih banyak daripada bagian tengah spesimen yakni mencapai 10,43% seperti yang terlihat pada **Tabel 4.2**. Adanya unsur C (karbon) dan Fe yang terdeteksi dikarenakan adanya kandungan unsur tersebut yang berasal dari spesifikasi komposisi awal baja AISI 1006.

Tabel 4.2 Hasil EDX untuk *Solution Treatment* 60 Menit

Unsur	Wt %	
	Tepi	Tengah
C	13,12	4,87
Fe	69,58	93,29
Cu	17,3	1,84

Kadar tembaga pada bagian tepi menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan bagian tengah yakni 17,3%.

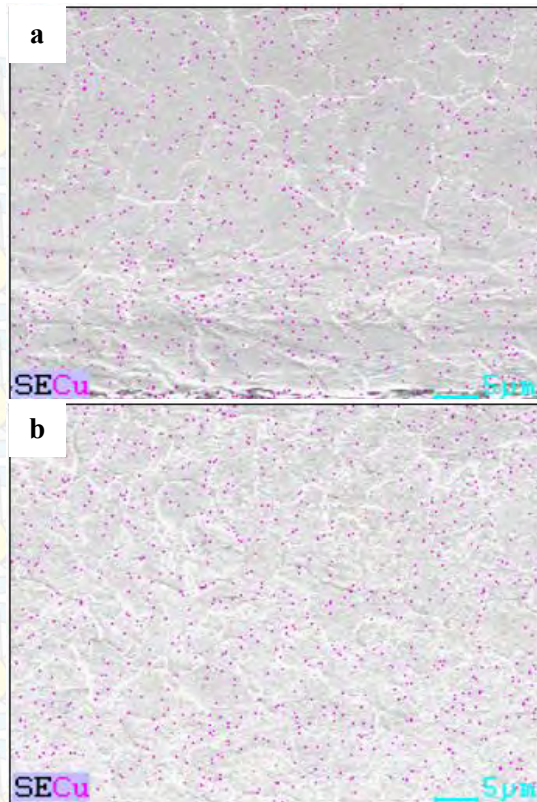
4.1.3.b Perbandingan Hasil SEM/EDX *Solution Treatment* 30 Menit dengan Tiga Variasi Waktu Tahan Aging

1.) Hasil Pengujian *Mapping* Tembaga dan EDX Aging Waktu Tahan 30 Menit

Pada **Gambar 4.9** dapat dilihat *mapping* dari tembaga pada spesimen baja AISI 1006 yang telah *dicopperizing* selama 5 menit kemudian dilakukan proses *solution treatment* 900°C waktu tahan 30 Menit dan *aging* 450° C dengan waktu tahan 30 menit.

Persebaran dari tembaga merata di seluruh bagian sampel tidak terpusat pada batas butir maupun pada butiran ferit. *Cluster* tembaga pada bagian tengah spesimen menyebar secara merata, baik di tengah maupun di batas butir, akan tetapi ada kecenderungan untuk *cluster* tembaga berkumpul pada bagian tengah butir.

Pada pengujian EDX menunjukkan bahwa komposisi tembaga pada bagian tepi spesimen lebih banyak daripada bagian tengah spesimen. Unsur Fe menjadi unsur dengan komposisi yang paling banyak diantara kelima unsur yang terdeteksi yaitu lebih dari 86%. Komposisi tembaga pada bagian tepi lebih banyak daripada komposisi tembaga pada bagian tengah baja AISI 1006 yang mencapai 1,44%.



Gambar 4.9 Hasil *Mapping* Tembaga Spesimen *Solution Treatment* 30 Menit dan *Aging* 30 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah

Dari hasil EDX menunjukkan komposisi unsur yang terkandung meliputi Fe, Cu, C, Al dan O. Komposisi spesimen yang digunakan sebenarnya tidak mengandung adanya O (Oksigen) tapi pada hasil EDX muncul adanya unsur tersebut. Hal ini mungkin disebabkan adanya pengaruh kontak dengan lingkungan luar pada permukaan spesimen saat dicopperizing dan

precipitation hardening sebelum dilakukan pengujian menggunakan SEM/EDX. Adanya unsur Al yang terdeteksi karena komposisi awal baja AISI 1006 yang mengandung Al meski hanya dalam jumlah yang relatif kecil, seperti yang ditunjukkan **Tabel 4.3** berikut ini.

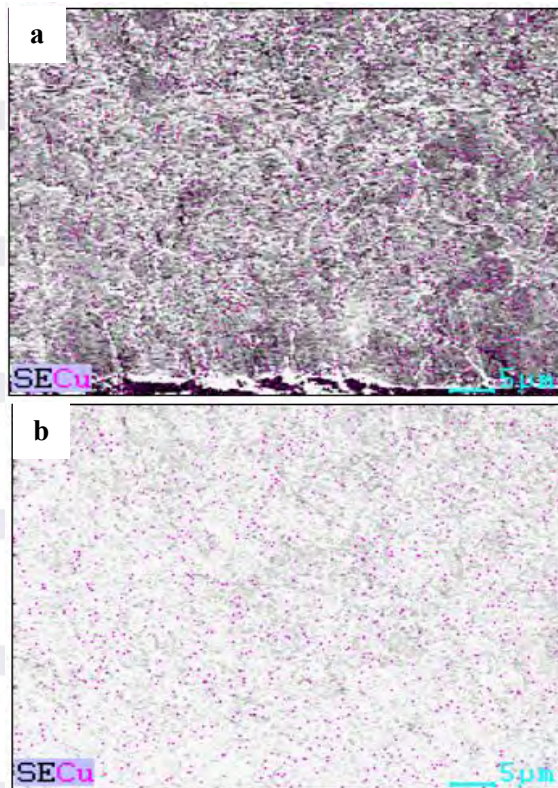
Tabel 4.3 Hasil EDX untuk *Solution Treatment* 30 Menit, *Aging* 30 Menit

Unsur	Wt %	
	Tepi	Tengah
C	7,2	1,7
O	2,86	1,37
Al	1,92	0,69
Fe	86,58	95,76
Cu	1,44	0,49

2.) Hasil Pengujian *Mapping* Tembaga dan EDX *Aging* Waktu Tahan 60 Menit

Mapping dari tembaga pada sampel baja AISI 1006 yang telah *dicroperizing* selama 5 menit kemudian dilakukan proses *solution treatment* 900°C waktu tahan 30 menit dan *aging* 450° C dengan waktu tahan 60 menit dapat dilihat pada **Gambar 4.10**. Persebaran dari tembaga merata di seluruh bagian spesimen baik di tepi maupun tengah, namun keberadaan *cluster* tembaga lebih terpusat berada di batas butir.

Pada pengujian EDX menunjukkan bahwa komposisi tembaga pada bagian tengah spesimen lebih sedikit bila dibandingkan dengan bagian tengah spesimen. Unsur Fe menjadi unsur dengan komposisi yang paling banyak diantara kelima unsur yang terdeteksi karena komposisinya yang menunjukkan angka tertinggi yaitu lebih dari 91%.



Gambar 4.10 Hasil *Mapping* Tembaga Spesimen *Solution Treatment* 30 Menit dan *Aging* 60 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah

Berdasarkan hasil EDX, komposisi unsur yang paling dominan adalah Fe,C dan Cu yang mana merupakan kandungan unsur dari komposisi material baja AISI 1006. Terdapat unsur O sebagai impuritas akibat adanya kontak dengan udara luar, hal ini juga dikarenakan penggunaan *muffle furnace* yang tidak berada

pada kondisi vakum dengan gas argon. Komposisi tiap unsur tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.4** dibawah ini.

Tabel 4.4 Hasil EDX untuk *Solution Treatment* 30 Menit, *Aging* 60 Menit

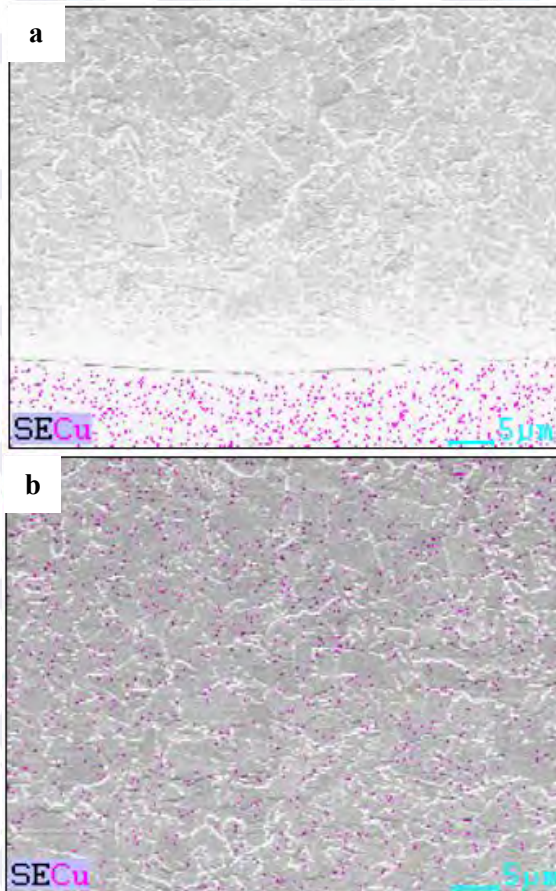
Unsur	Wt %	
	Tepi	Tengah
C	2,04	4,75
O	1,23	2,35
Al	0,64	0,66
Fe	94,61	91,14
Cu	1,49	1,1

3.) Hasil Pengujian *Mapping* Tembaga dan EDX *Aging* Waktu Tahan 90 Menit

Berdasarkan **Gambar 4.11** menunjukkan *mapping* dari tembaga pada spesimen baja AISI 1006 yang telah *dicopperizing* selama 5 menit kemudian dilakukan proses *solution treatment* 900°C waktu tahan 30 Menit dan *aging* 450° C dengan waktu tahan 90 menit. Pada bagian tepi terdapat penumpukkan cluster tembaga seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.11.a**, namun seiring ke bagian tengah cluster tembaga yang terbentuk tersebar secara merata meskipun memiliki kecenderungan berkumpul di bagian batas butir. Hal tersebut dapat diamati pada **Gambar 4.11.b** yang mana titik ungu yang menunjukkan *cluster* tembaga lebih banyak terdapat pada garis putih yang merupakan batas butir.

Pada pengujian EDX **Tabel 4.5** menunjukkan bahwa komposisi tembaga pada bagian tepi spesimen lebih banyak daripada bagian tengah spesimen dengan presentase 5,72% di bagian tepi dan 1,44% di bagian tengah. Unsur Fe menjadi unsur

dengan komposisi yang tertinggi diantara kelima unsur yang terdeteksi yakni lebih dari 85%.



Gambar 4.11 Hasil *Mapping* Tembaga Spesimen *Solution Treatment* 30 Menit dan *Aging* 90 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah

Adanya pengaruh kontak dengan lingkungan luar pada permukaanspesimen saat dicopperizing dan *precipitation hardening* sebelum dilakukan pengujian menggunakan SEM/EDX penyebab adanya unsur O dalam pada hasil pengujian EDX. Komposisi spesimen yang digunakan sebenarnya tidak mengandung adanya O (Oksigen) tapi pada pengujian EDX unsur tersebut muncul. Terdapat juga unsur Al dalam jumlah relatif kecil sebagai salah satu komposisi yang terkandung dalam baja AISI 1006.

Tabel 4.5 Hasil EDX untuk *Solution Treatment* 30 Menit, *Aging* 90 Menit

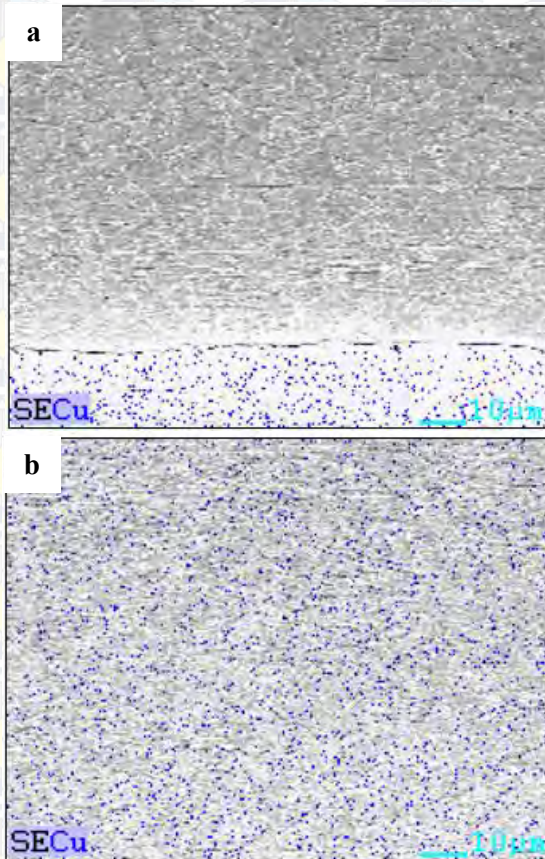
Unsur	Wt %	
	Tepi	Tengah
C	5,73	2,96
O	2,41	1,87
Al	0,73	0,52
Fe	85,41	93,21
Cu	5,72	1,44

4.1.3.c Perbandingan Hasil SEM/EDX *Solution Treatment* 60 Menit Tiga Variasi Waktu Tahan *Aging*

1.) Hasil Pengujian *Mapping* Tembaga dan EDX *Aging* Waktu Tahan 30 Menit

Pada Gambar 4.12 memperlihatkan *mapping* dari tembaga pada sampel baja AISI 1006 yang telah dicopperizing selama 5 menit kemudian dilakukan proses *solution treatment* 900°C waktu tahan 60 Menit dan *aging* 450° C dengan waktu tahan 30 menit. Persebaran dari tembaga pada bagian tepi mengalami penumpukan sedangkan untuk bagian tengah *cluster* tembaga merata di seluruh bagian sampel terlihat dari letak persebaran titik biru pada gambar. Namun sama halnya dengan

variabel waktu tahan *aging* lainnya dimana *cluster* tembaga cenderung berkumpul pada bagian batas butir.



Gambar 4.12 Hasil *Mapping* Tembaga Spesimen *Solution Treatment* 60 Menit dan *Aging* 30 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah

Berdasarkan pengujian EDX yang ditunjukkan oleh **Tabel 4.6** terlihat bahwa komposisi tembaga pada bagian tepi spesimen lebih banyak daripada bagian tengah spesimen. Unsur

Cu menjadi unsur dengan komposisi yang paling banyak setelah Fe diantara ketiga unsur yang terdeteksi. Unsur Fe merupakan unsur yang paling utama dengan komposisi melebihi 79%.

Tabel 4.6 Hasil EDX untuk *Solution Treatment* 60 Menit, *Aging* 30 Menit

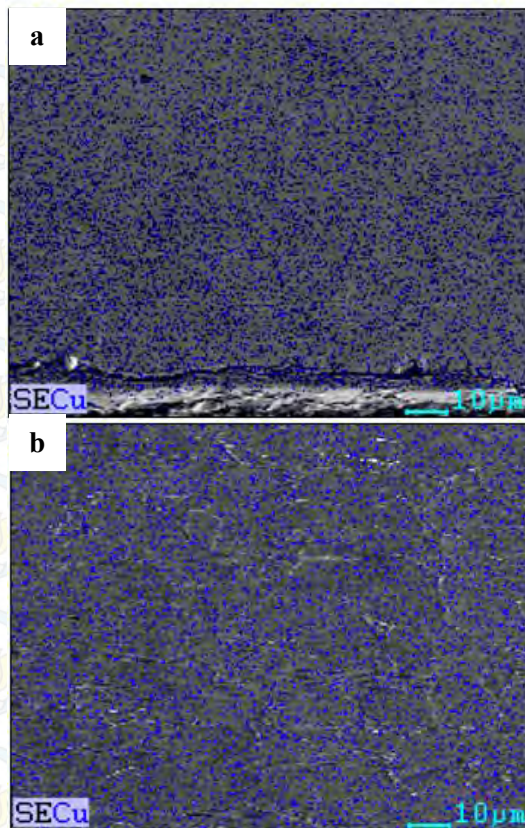
Unsur	Wt %	
	Tepi	Tengah
C	-	5,95
Cu	20,93	11
Fe	79,07	83,05

Kadar Cu pada bagian tepi lebih banyak dibandingkan dengan kadar Cu yang berada di bagian tengah spesimen yakni mencapai 20,93%.

2.) Hasil Pengujian *Mapping* Tembaga dan EDX *Aging* Waktu Tahan 60 Menit

Mapping dari tembaga pada sampel baja AISI 1006 yang telah *dicopperizing* selama 5 menit kemudian dilakukan proses *solution treatment* 900°C waktu tahan 60 menit dan *aging* 450° C dengan waktu tahan 60 menit dapat dilihat pada **Gambar 4.13**. Persebaran dari tembaga merata di seluruh bagian spesimen baik di tepi maupun tengah. Tidak terlihat adanya kecenderungan penumpukkan *cluster* tembaga pada batas butir, namun tersebar menyeluruh baik di batas butir maupun di tengah butir ferit.

Pada pengujian EDX menunjukkan bahwa komposisi tembaga pada bagian tengah spesimen lebih sedikit bila dibandingkan dengan bagian tepi spesimen. Hal ini dikarenakan pada bagian permukaan spesimenlah yang paling awal memiliki kontak dengan tembaga cair pada saat *copperizing* dilakukan sehingga jumlah unsur tembaga di tengah lebih sedikit.



Gambar 4.13 Hasil *Mapping* Tembaga Spesimen *Solution Treatment* 60 Menit dan *Aging* 60 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah

Berdasarkan hasil EDX, komposisi unsur yang paling dominan adalah Fe,C dan Cu yang mana merupakan kandungan unsur dari komposisi material baja AISI 1006. Unsur Fe menjadi unsur dengan komposisi terbanyak diantara ketiga unsur yang terdeteksi karena komposisinya yang menunjukkan angka tertinggi yang mencapai 92,52% di bagian tengah. Jumlah

presentase komposisi tiap unsur tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.7** berikut.

Tabel 4. 7Hasil EDX untuk *Solution Treatment* 60 Menit, *Aging* 60 Menit

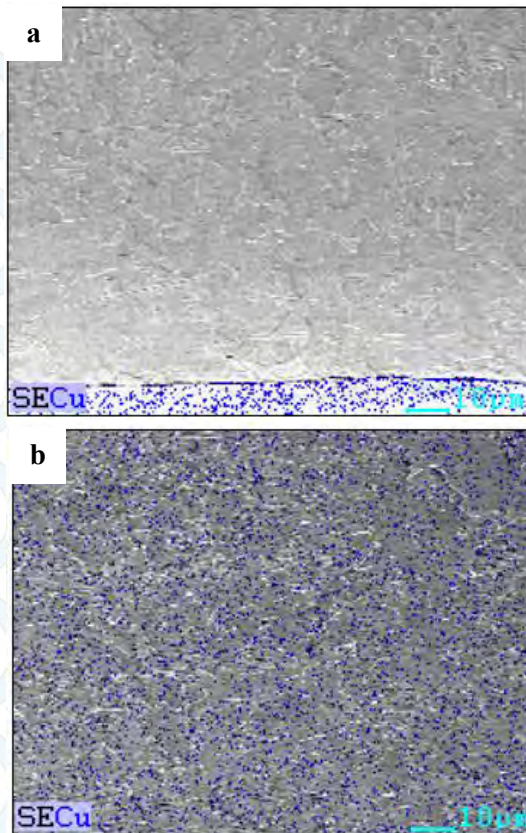
Unsur	Wt %	
	Tepi	Tengah
C	12,97	6,52
Cu	3,26	0,96
Fe	83,77	92,52

3.) Hasil Pengujian *Mapping* Tembaga dan EDX *Aging* Waktu Tahan 90 Menit

Dapat dilihat bahwa pada **Gambar 4.14** persebaran dari tembaga merata di seluruh bagian sampel tidak terpusat pada batas butir maupun pada butiran ferit. *Cluster* tembaga yang ditunjukkan oleh titik biru pada bagian tengah spesimen menyebar secara merata, akan tetapi ada kecenderungan untuk *cluster* tembaga berkumpul pada batas butir di bagian garis yang berwarna putih. Hal tersebut adalah hasil *mapping* dari tembaga pada sampel baja AISI 1006 yang telah *dicopperizing* selama 5 menit kemudian dilakukan proses *solution treatment* 900°C waktu tahan 30 Menit dan *aging* 450° C dengan waktu tahan 30 menit.

Tabel 4. 8 Hasil EDX untuk *Solution Treatment* 60 Menit, *Aging* 90 Menit

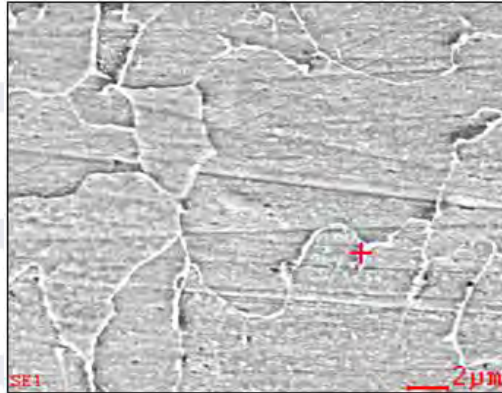
Unsur	Wt %	
	Tepi	Tengah
C	12,04	23,7
Cu	36,98	23,26
Fe	50,98	53,04



Gambar 4.14 Hasil *Mapping* Tembaga Spesimen *Solution Treatment* 60 Menit dan *Aging* 90 Menit Pada Bagian (a) Tepi dan (b) Tengah

Pada **Tabel 4.8**, hasil pengujian EDX menunjukkan bahwa komposisi tembaga pada bagian tepi spesimen lebih banyak daripada bagian tengah spesimen. Unsur Fe menjadi unsur dengan komposisi presentasi yang paling banyak diantara ketiga unsur yang terdeteksi.

Adanya kecenderungan *cluster* tembaga yang lebih banyak berkumpul pada batas butir dibandingkan dengan pada bagian tengah butir ferit inilah maka pengambilan uji titik (*spotting*) dengan EDX pada spesimen dilakukan. Hasilnya dapat diamati pada **Gambar 4.15** berikut ini.



Element	Wt%	Ar%
CK	09.74	33.67
CuL	08.61	05.63
FeK	81.65	60.71
Matrix	Correction	ZAF

Gambar 4.15 Hasil Pengujian *Spotting* EDX Pada Spesimen dengan Variabel Waktu Tahan *Solution Treatment* 60 Menit dan Waktu Tahan *Aging* 30 Menit.

Terlihat bahwa pada hasil pengujian *spotting* EDX, kandungan unsur pada batas butir adalah Fe, Cu dan C. Hal inilah yang mengindikasikan adanya partikel Fe-Cu yang berada pada batas butir matriks ferit.

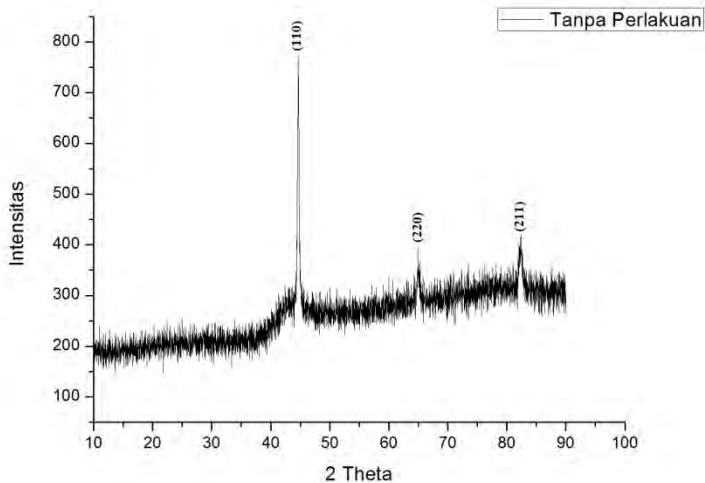
Hasil EDX menunjukkan adanya unsur Fe, C, Cu, Al dan O pada komposisi spesimen baja AISI 1006. Selanjutnya untuk mengetahui fasa atau senyawa yang dapat terbentuk oleh kelima unsur tersebut dilakukanlah uji *X-ray Diffraction*.

4.1.4 Pengujian X-ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD dilakukan dengan menggunakan alat XRD *PAN Analytical X'Pert Pro* dengan parameter sudut $2\theta = 5^\circ - 90^\circ$ dan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ 1,54060 Å untuk mengetahui fasa yang terbentuk dari hasil *copperizing* dan *precipitation hardening* baja AISI 1006. Identifikasi fasa hasil pengujian dilakukan dengan menggunakan *software High Score Plus* serta dengan pencocokan manual dengan kartu PDF dari *Software ICDD* untuk puncak – puncak yang teridentifikasi saat *Search Match*.

4.1.4.a Pengujian XRD Sebelum *Copperizing*

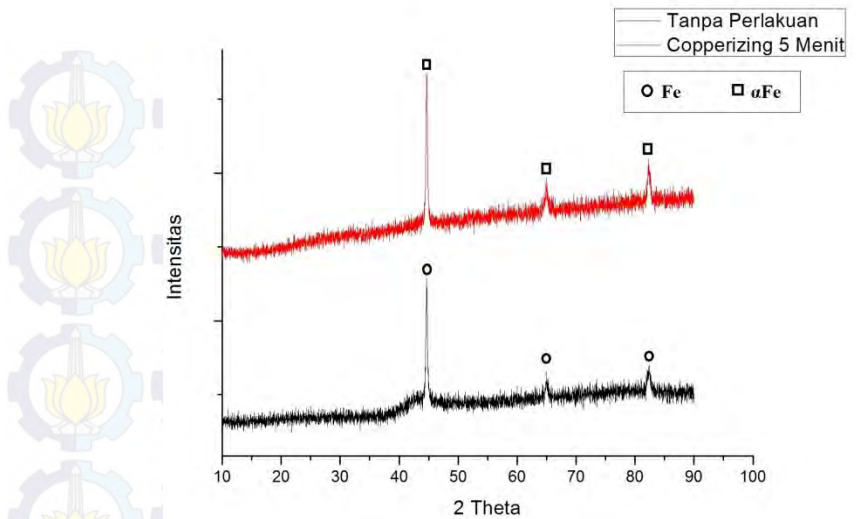
Dari Hasil XRD spesimen baja AISI 1006 tanpa perlakuan yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.16** nampak bahwa terbentuk tiga puncak fasa tertinggi. Ketiga puncak teridentifikasi sebagai fasa Fe sesuai dengan kode JCPDS 00-006-0696. Puncak-puncak yang muncul menunjukkan orientasi bidang tertentu. Fasa Fe yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan posisi puncak tertinggi berada pada sudut difraksi 2θ 44,6563 dan memiliki bidang kristal (110), sedangkan dua puncak tertinggi lainnya terletak pada sudut difraksi 2θ 64,9553, memiliki bidang kristal (220) dan pada sudut difraksi 2θ 82,3476 memiliki bidang kristal (211). Terbentuknya tiga puncak yang keseluruhan menampakkan fasa Fe berkesesuaian dengan spesifikasi material uji yaitu AISI 1006 yang mana komposisi Fe paling dominan.



Gambar 4. 16 Hasil Pengujian XRD Spesimen Tanpa Perlakuan

4.1.4.b Pengujian XRD Sesudah *Copperizing* 5 Menit

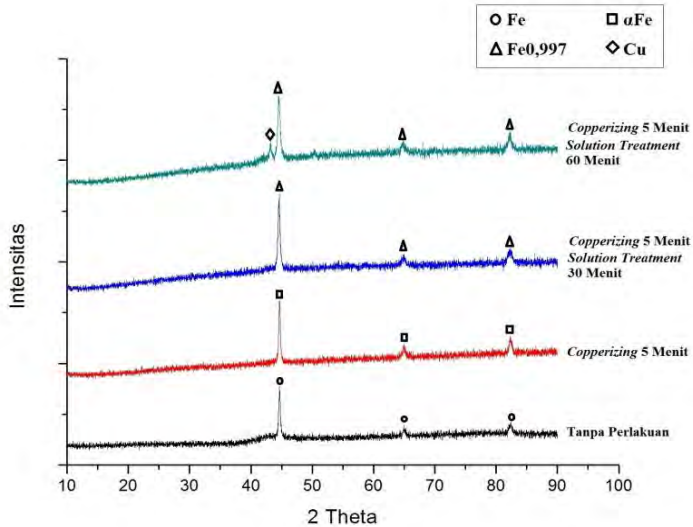
Berdasarkan hasil XRD spesimen baja AISI 1006 dengan perlakuan *copperizing* dengan waktu *immerse* 5 menit terlihat pada **Gambar 4.17** bahwa terbentuk adanya tiga puncak fasa tertinggi. Ketiga puncak teridentifikasi sebagai fasa αFe sesuai dengan kode JCPDS 03-065-4899. Fasa αFe yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan posisi puncak tertinggi berada pada sudut difraksi 2θ pada 44,6594 dan memiliki bidang kristal (110), sedangkan pada dua puncak berikutnya terbentuk sudut difraksi 2θ pada 64,9733 memiliki bidang kristal (200) dan pada sudut difraksi 2θ pada 82,2498 memiliki bidang kristal (211).



Gambar 4.17 Hasil Pengujian XRD Spesimen *Copperizing* dengan Waktu *Immerse* 5 Menit

4.1.4.c Pengujian XRD Variabel Waktu Tahan *Solution Treatment*

Hasil pengujian XRD untuk spesimen baja AISI 1006 dengan perlakuan *copperizing* 5 menit kemudian *solution treatment* 900°C dengan waktu tahan 30 menit dan 60 ditunjukkan oleh **Gambar 4.18**. Pada spesimen dengan variasi *solution treatment* 30 dan 60 menitterbentuk adanya masing-masing tiga puncak fasa tertinggi yang teridentifikasi sebagai fasa $\text{Fe}_{0.997}$ atau $\text{Cu}_{0.003}\text{Fe}_{0.997}$ sesuai dengan kode JCPDS 01-071-7667. Namun pada hasil XRD spesimen *solution treatment* 60 menit muncul satu puncak yang teridentifikasi sebagai fasa yang berbeda yang teridentifikasi sebagai fasa Cu sesuai dengan kode JCPDS 01-085-1326



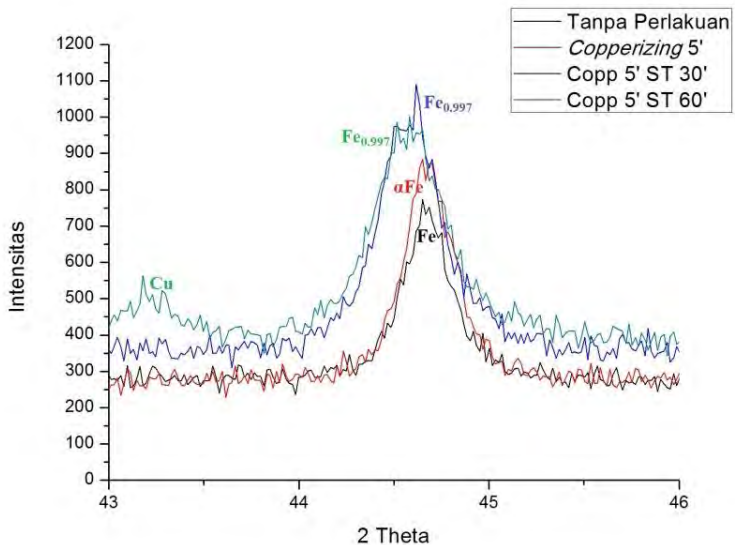
Gambar 4.18 Hasil Pengujian XRD Spesimen dengan Variasi Waktu Tahan *Solution Treatment*

Analisis XRD untuk Fasa Fe_{0.997} spesimen *solution treatment* 30 menit teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan posisi puncak tertinggi berada pada sudut difraksi 2044,6243 dengan bidang kristal (110), sedangkan dua puncak tertinggi lainnya terletak pada sudut difraksi 2064,9855 dengan bidang kristal (200) dan pada sudut difraksi 2082,2270 dengan bidang kristal (211).

Lain halnya untuk spesimen *solution treatment* 60 menit Fasa Fe_{0.997} yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan posisi puncak tertinggi berada pada sudut difraksi 2044,588 yang memiliki bidang kristal (110), sedangkan kedua puncak lainnya terletak pada sudut difraksi 2064,7224 memiliki bidang kristal (200) dan pada sudut difraksi 202,2766 memiliki bidang kristal (211). Sedangkan untuk fasa Cu yang

teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan puncak sudut difraksi 2θ yaitu 43,2287 yang memiliki bidang kristal (111).

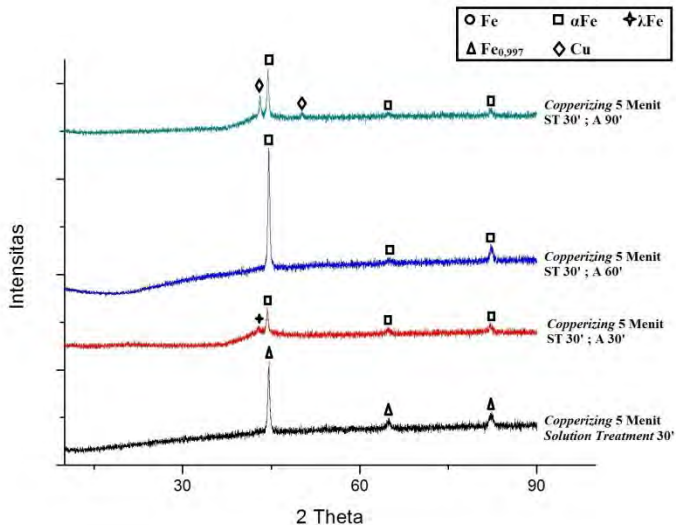
Pada perbandingan empat kurva hasil XRD yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.19** terlihat adanya pergeseran sudut difraksi dan perubahan intensitas dari puncak tertinggi. Pergeseran puncak tersebut berada pada rentang sudut difraksi 2θ 44-45. Ketinggian intensitas hasil *solution treatment* pun menjadi sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan sebelum proses. Hal ini menyatakan bahwa adanya *peak broadening* atau pelebaran kurva pada puncak difraksi tertinggi tiap variasi waktu tahan *solution treatment*. Hal tersebut mengindikasikan bahwa telah terjadi tegangan dalam (*microstrain*) pada kristal Fe akibat proses *solution treatment*.



Gambar 4.19 Perubahan *Peak Broadening* Puncak Tertinggi untuk Variabel Waktu Tahan *Solution Treatme*

4.1.4.d Pengujian XRD *Solution Treatment* 30 Menit dan *Aging* dengan Tiga Variasi Waktu Tahan

Pada **Gambar 4.20** menunjukkan perbandingan hasil pengujian XRD untuk spesimen variabel waktu tahan *solution treatment* 30 menit diikuti *aging* dengan variasi waktu tahan 30, 60, dan 90 menit. Hasil untuk variabel waktu tahan *aging* 30 menit terlihat bahwa terbentuk empat puncak fasa tertinggi.



Gambar 4.20 Hasil Pengujian XRD Spesimen dengan *Solution Treatment* 30 Menit dengan Tiga Variasi Waktu Tahan *Aging*

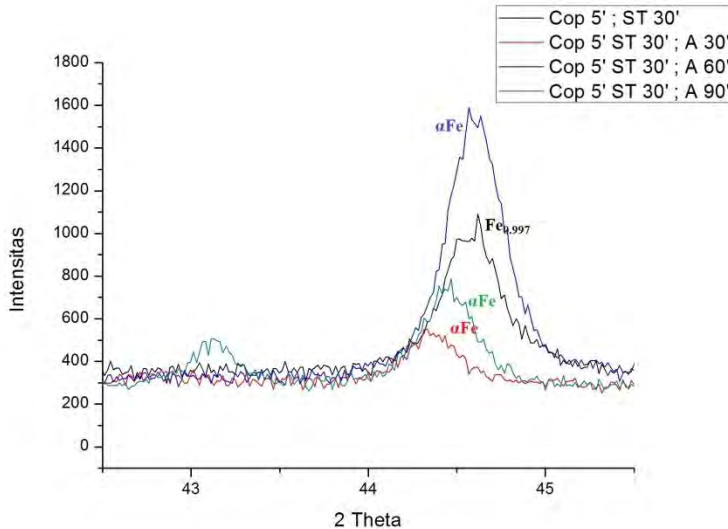
Terdapat 3 puncak teridentifikasi sebagai fasa αFe yang sesuai dengan kode JCPDS 01-085-1410 dan fasa γFe yang sesuai dengan kode JCPDS 00-052-0513. Fasa γFe yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan posisi sudut difraksi 2θ yaitu 42,7593 yang memiliki bidang kristal (111), sedangkan Fasa αFe yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan posisi sudut difraksi 2θ yaitu 44,3491 yang memiliki bidang

kristal (110), sudut difraksi 2 θ yaitu 64,7906 dan memiliki bidang kristal (200) serta puncak dengan sudut difraksi 2 θ yaitu 82,1669 yang memiliki bidang kristal (211).

Dapat dilihat bahwa hasil pengujian XRD variabel waktu tahan *aging* 60 menit menunjukkan adanya tiga puncak fasa tertinggi. Ketiga puncak teridentifikasi sebagai fasa α Fe yang berkesesuaian dengan kode JCPDS 03-065-4899. Fasa α Fe yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan posisi puncak tertinggi berada pada sudut difraksi 2044,5728 dengan bidang kristal (110), sedangkan pada sudut difraksi 2064,9540 memiliki bidang kristal (200) dan pada sudut difraksi 2082,1830 memiliki bidang kristal (211).

Hasil pengujian XRD variabel waktu tahan *aging* 90 menit menunjukkan adanya lima puncak fasa. Terdapat tiga puncak teridentifikasi sebagai fasa α Fe yang sesuai dengan kode JCPDS 03-065-4899 sedangkan untuk dua puncak lainnya teridentifikasi sebagai fasa Cu yang sesuai dengan kode JCPDS 00-001-1241. Fasa α Fe yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan tiga posisi sudut difraksi 2 θ yaitu 44,4373 dengan bidang kristal (110); sudut difraksi 2064,8186 dengan bidang kristal (200); dan sudut difraksi 2082,1596 dengan bidang kristal (211), sedangkan untuk fasa Cu yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan dua posisi sudut difraksi 2 θ yaitu 43,1324 yang memiliki bidang kristal (111), dan sudut difraksi 2 θ yaitu 50,2106 yang memiliki bidang kristal (200).

Pada spesimen hasil *aging* dengan variabel *solution treatment* 30 menit sudah tidak ditemukan lagi puncak difraksi fasa $\text{Fe}_{0.997}$ atau $\text{Cu}_{0.003}\text{Fe}_{0.997}$ serta diikuti dengan munculnya puncak difraksi α Fe dengan intensitas yang tertinggi serta munculnya fasa baru yakni Cu dan γ Fe. Adanya fasa baru tersebut terindikasi karena adanya proses perlakuan panas pada spesimen. Waktu pendinginan pada proses *aging* menyebabkan atom Cu yang terjebak berdifusi keluar dari atom Fe sehingga terbentuklah fasa Fe dan Cu.

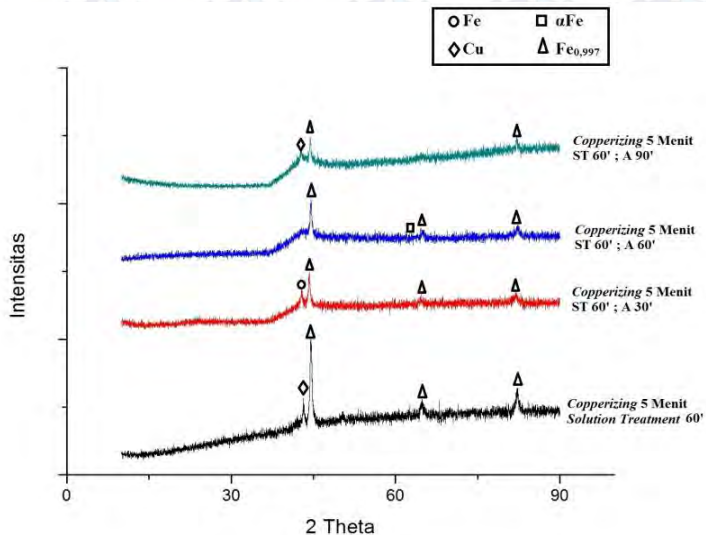


Gambar 4.21 Perubahan *Peak Broadening* Puncak Tertinggi Variabel *Solution Treatment* 30 Menit

Bila diperhatikan, **Gambar 4.21** menunjukkan perubahan pergeseran atau besar sudut difraksi pada puncak Fe. Perubahan ini menyatakan adanya *peak broadening* atau pelebaran kurva pada puncak difraksi tersebut. Hal tersebut mengindikasikan adanya tegangan dalam (*microstrain*) akibat proses *aging*. Pelebaran puncak optimum ditunjukkan oleh spesimen *solution treatment* 30 menit diikuti proses *aging* dengan waktu tahan 60 menit, namun intensitas puncak difraksi spesimen ini semakin meningkat. Intensitas yang semakin tinggi menunjukkan bahwa dengan perlakuan *aging* menyebabkan fasa Fe semakin kristalin dan dominan.

4.1.4.e Pengujian XRD *Solution Treatment* 60 Menit dan *Aging* dengan Tiga Variasi Waktu Tahan

Pembandingan hasil pengujian XRD untuk spesimen variabel waktu tahan *solution treatment* 60 menit diikuti *aging* dengan variasi waktu tahan 30, 60, dan 90 menit ditunjukkan oleh **Gambar 4.22** berikut



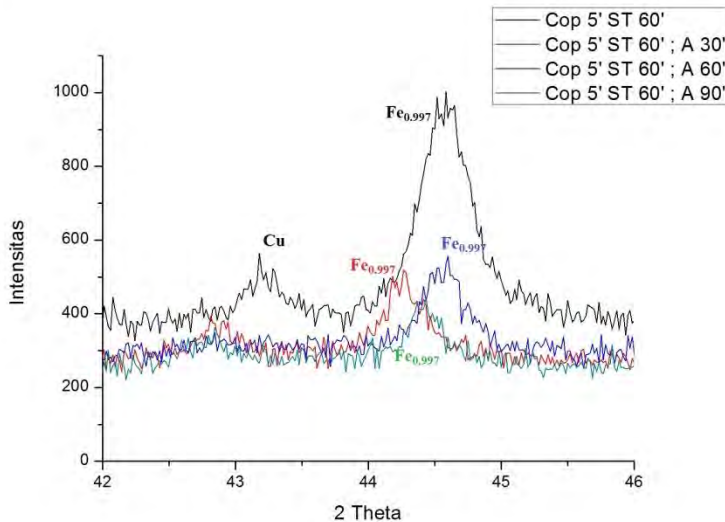
Gambar 4. 22 Hasil Pengujian XRD Spesimen dengan *Solution Treatment* 60 Menit dengan Tiga Variasi Waktu Tahan *Aging*

Hasil pengujian XRD variabel waktu tahan *aging* 30 menit terlihat adanya pembentukan empat puncak fasa. Terdapat tiga puncak teridentifikasi sebagai fasa $\text{Fe}_{0.997}$ atau $\text{Cu}_{0.003}\text{Fe}_{0.997}$ yang berkesesuaian dengan kode JCPDS 01-071-7667 sedangkan untuk 1 puncak lainnya teridentifikasi sebagai senyawa Fe yang sesuai dengan kode JCPDS 01-071-4407. Untuk fasa $\text{Fe}_{0.997}$ atau $\text{Cu}_{0.003}\text{Fe}_{0.997}$ ang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan tiga posisi sudut difraksi 2θ yaitu 44,2401 dengan bidang kristal (111); sudut difraksi 2) 64,7090 dengan bidang kristal

(200); dan sudut difraksi 2θ 81,9651 dengan bidang kristal (211), sedangkan untuk Fasa Fe yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Orthorhombic dengan posisi sudut difraksi 2θ yaitu 42,8493 yang memiliki bidang kristal (111).

Dapat dilihat bahwa hasil pengujian XRD variabel waktu tahan *aging* 60 menit bahwa terdapat tiga puncak fasa dengan empat nilai sudut difraksi 2θ . Tiga puncak diantaranya teridentifikasi sebagai fasa $\text{Fe}_{0,997}$ atau $\text{Cu}_{0,003}\text{Fe}_{0,997}$ yang sesuai dengan kode JCPDS 01-071-7667 sedangkan untuk satu sudut difraksi 2θ lainnya teridentifikasi sebagai fasa αFe sesuai dengan kode JCPDS 01-085-1410. Untuk Fasa $\text{Fe}_{0,997}$ yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan tiga posisi sudut difraksi 2θ yaitu 44,6164 dengan bidang kristal (110); sudut difraksi 2θ 64,8880 dengan bidang kristal (200); dan sudut difraksi 2θ 82,3198 dengan bidang kristal (211), sedangkan untuk fasa αFe yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan posisi sudut difraksi 2θ yaitu 64,0729 dan memiliki bidang kristal (211).

Pada **Gambar 4.22** menunjukkan bahwa hasil pengujian XRD variabel waktu tahan *aging* 90 menit terbentuk adanya tiga puncak fasa. Terdapat dua puncak yang teridentifikasi sebagai fasa $\text{Fe}_{0,997}$ atau $\text{Cu}_{0,003}\text{Fe}_{0,997}$ yang sesuai dengan kode JCPDS 01-071-7667 sedangkan untuk satu puncak lainnya teridentifikasi sebagai fasa Cu yang sesuai dengan kode JCPDS 01-071-4611. Fasa $\text{Fe}_{0,997}$ atau $\text{Cu}_{0,003}\text{Fe}_{0,997}$ yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan dua posisi sudut difraksi 2θ yaitu 44,3906 dengan bidang kristal (110) dan posisi sudut difraksi 2θ 82,1031 dengan bidang kristal (211), sedangkan untuk Fasa Cu yang teridentifikasi memiliki sistem kristal Cubic dengan posisi sudut difraksi 2θ yaitu 42,7942 yang memiliki bidang kristal (111).



Gambar 4. 23 Perubahan *Peak Broadening* Puncak Tertinggi Variabel *Solution Treatment* 60 Menit

Setelah dilakukannya proses *aging* terbentuk puncak difraksi dengan fasa baru seperti $Fe_{0.997}$. Hal ini membuktikan bahwa proses *aging* sudah mampu memberikan energi untuk merubah parameter kisi dan struktur kristal dari atom Fe pada spesimen serta mengindikasikan pengaruh lama waktu tahan *aging* terhadap transformasi fasa Fe. Adanya pergeseran pada puncak difraksi tertinggi seiring dengan lamanya waktu tahan proses *aging* mengindikasikan adanya tegangan dalam (*microstrain*).

Pada **Tabel 4.9** ditunjukkan nilai regangan dalam (*microstrain*) spesimen variabel waktu tahan *solution treatment* dan waktu tahan *aging*. Nilai ini didapatkan dengan mendapatkan nilai B dari nilai FWHM hasil pengujian.

Tabel 4.9Perubahan Nilai *Microstrain* Tiap Variasi Waktu Tahan

Variabel	Microstrain	Variabel	Microstrain
ST 30'	0,0006396	ST 60'	0,003068
A 30'	0,0019402	A 30'	0,001539
A 60'	0,0002147	A 60'	0,0023155
A 90'	0,002325	A 90'	0,002708

Dari **Tabel 4.9** terlihat bahwa nilai tegangan dalam (*microstrain*) mengalami perubahan seiring lamanya waktu tahan proses *solution treatment* dan *aging*. Perubahan nilai *microstain* inilah yang menandai adanya difusi atom Cu kedalam atom Fe.

4.1.5 Pengujian Metalografi (Struktur Mikro)

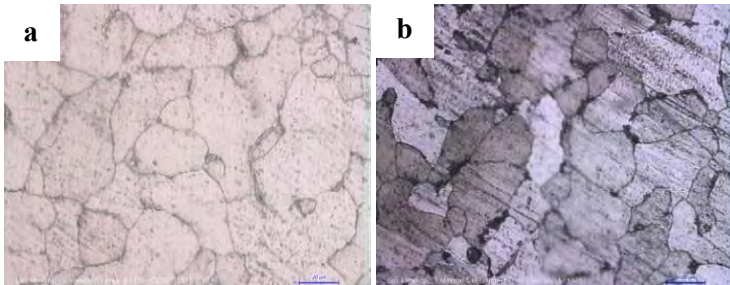
Pengamatan struktur mikro dari hasil *copperizing* dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis lebih lanjut perubahan secara struktur yang diakibatkan oleh pengaruh penambahan tembaga kedalam baja AISI 1006 serta pengaruh dari proses *precipitation hardening* yang telah dilakukan. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Olympus BX51M-RF. Larutan etsa yang digunakan adalah larutan etsa nital yang terdiri dari asam nitrat (HNO_3) dan metanol. Spesimen dietsa menggunakan metode *swap* (usap), dimana dilakukan 5-7 kali *swap* dalam pengetsaan spesimen dalam penelitian ini. Perbesaran yang digunakan dalam pengambilan foto mikro dalam penelitian ini adalah 500 dan 1000 diambil di bagian tengah spesimen.

4.1.5.a Pengamatan Struktur Mikro Sebelum dan Sesudah

Copperizing

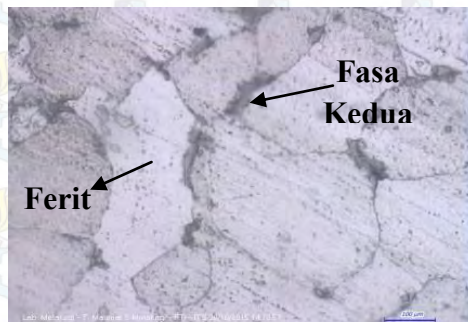
Berdasarkan **Gambar 4.24** menunjukkan hasil struktur mikro dari baja AISI 1006 dengan struktur dominan ferit baik spesimen sebelum dan sesudah *copperizing*. Hal ini dapat dilihat

dari warna putih dominan dari butiran yang ada. Bentukbutirannya pun teratur dengan orientasi butir bulat yang meratadan batas butir dari ferit terlihat jelas. Terlihat juga bahwa persebaran ferit menyeluruh dalam sampel awal dengan rata-rata ukuran butir yang sama.



Gambar 4. 24 Hasil Struktur Mikro (a) Tanpa Perlakuan dan (b) *Copperizing* 5 Menit dengan Perbesaran 500

Dapat diamati pada **Gambar 4.25** terlihat bahwa terdapat perbedaan pada struktur mikro *copperizing* 5 menit, terbentuk adanya struktur fasa kedua yang berwarna hitam gelap membentuk pulau pada pertemuan garis batas butir .

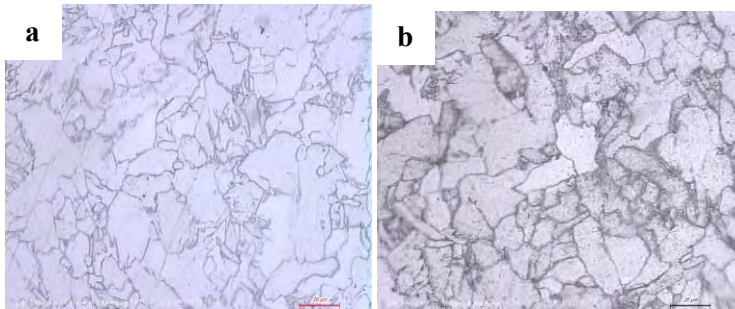


Gambar 4. 25 Hasil Struktur Mikro *Copperizing* 5 Menit dengan Perbesaran 1000

4.1.5.b Pengamatan Struktur Mikro Sesudah *Solution*

Treatment 900°C

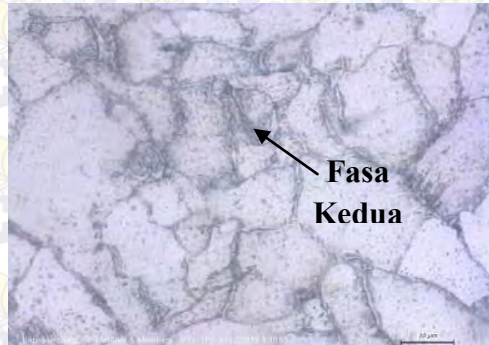
Pada **Gambar 4.26** membandingkan struktur mikro *solution treatment* dengan perbedaan waktu tahan, dapat kita lihat bahwa bentuk butir menjadi tidak beraturan (iregular) dan orientasinya yang *randomly equiaxed*. Secara keseluruhan struktur mikro yang terbentuk adalah *ferrite* dilihat dari warna struktur yang putih dan terang, terlihat juga batas butir dari *ferrite* yang tampak dengan jelas.



Gambar 4.26 Hasil Struktur Mikro *Copperized-AISI 1006 Solution Treatment* dengan Waktu Tahan (a) 30 Menit dan (b) 60 Menit dengan Perbesaran 500

Dapat diamati pada **Gambar 4.27** bahwa struktur yang terbentuk adalah butir iregular equiaksial pada proses perlakuan *solution treatment* tembaga pada baja. Terdapat struktur berwarna hitam diantara butir ferit yang nampak jelas pada batas butir. Terbentuknya struktur berwarna hitam tidak begitu tampak pada **Gambar 4.27.a** apabila dibandingkan dengan **Gambar 4.27.b**, dapat dikatakan bahwa semakin lama waktu tahan *solution treatment* struktur berwarna hitam pada batas butir semakin terlihat. Struktur hitam tersebut mengindikasikan adanya fasa kedua yang terbentuk setelah proses *solution treatment*. Namun struktur hitam gelap yang terlihat tidak membentuk suatu pulau

kecil melainkan merata disepanjang batas butir, berbeda halnya dengan yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.25**.



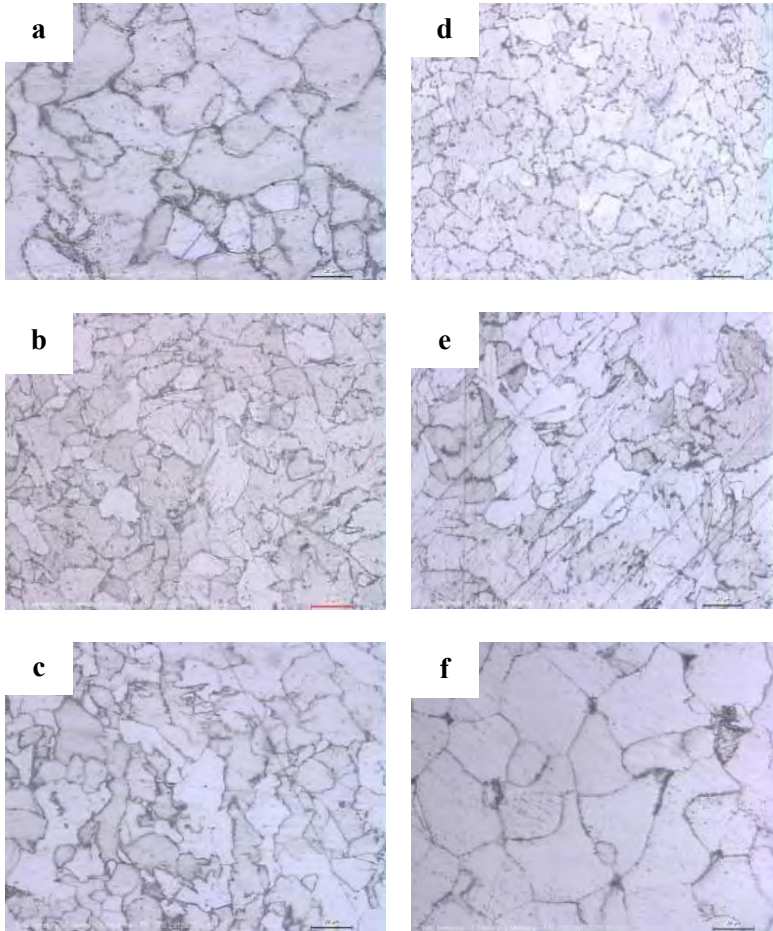
Gambar 4.27 Hasil Struktur Mikro *Copperized-AISI 1006 Solution Treatment* dengan Waktu Tahan 60 Menit dengan Perbesaran 1000

4.1.5.c Pengamatan Struktur Mikro Sesudah Aging 450°C

Setelah dilakukan proses aging, didapatkan gambar hasil pengujian metalografi seperti yang ditunjukkan **Gambar 4.28**, dapat kita lihat bahwa struktur mikro yang terbentuk pada spesimen adalah dominan *ferrite*, hal tersebut nampak dengan adanya butir yang berwarna putih terang yang merata pada keseluruhan spesimen. Orientasi bentuk butir ferit iregular dan cenderung memanjang bila dibandingkan dengan hasil proses *solution treatment*, namun batas butir terlihat dengan jelas dan semakin rapat.

Perubahan struktur mikro spesimen hasil *aging* tampak bahwa pada batas butir terbentuk struktur berwarna hitam yang merata disepanjang garis batas butir seperti halnya pada spesimen *solution treatment* yang merupakan struktur fasa kedua berwarna hitam gelap. Hal ini terjadi pada ketiga variasi waktu tahan *aging*. Akan tetapi persebaran fasa kedua ini tidak sebanyak yang

diperlihatkan pada hasil metalografi spesimen hasil proses *solution treatment*.



Gambar 4.28 Hasil Struktur Mikro *Copperized-AISI 1006 Solution Treatment* dengan Waktu Tahan (a;b;c) 30 Menit dan (d;e;f) 60 Menit kemudian *Aging* dengan Waktu Tahan (a;d) 30 Menit, (b;e) 60 Menit dan (c;f) 90 Menit dengan Perbesaran 500

Pada spesimen *aging* dengan variasi *solution treatment* 30 menit, yang awalnya tidak terbentuk struktur fasa kedua namun setelah dilakukannya *aging* struktur ini mulai terbentuk dan terlihat jelas. Hal ini dapat diamati pada **Gambar 4.28.(a;b;c)**. Pada **Gambar 4.28.f** terlihat bahwa butir yang terbentuk lebih besar dari yang lain serta bentuk feritnya membentuk polygonal ferit.

Berdasar **Gambar 4.29**, terlihat lebih jelas keberadaan struktur fasa kedua berwarna hitam dan gelap pada batas butir matriks ferit. Struktur tersebut terlihat merata di sepanjang garis batas butir, namun tidak pada keseluruhan batas butir yang tersebar.



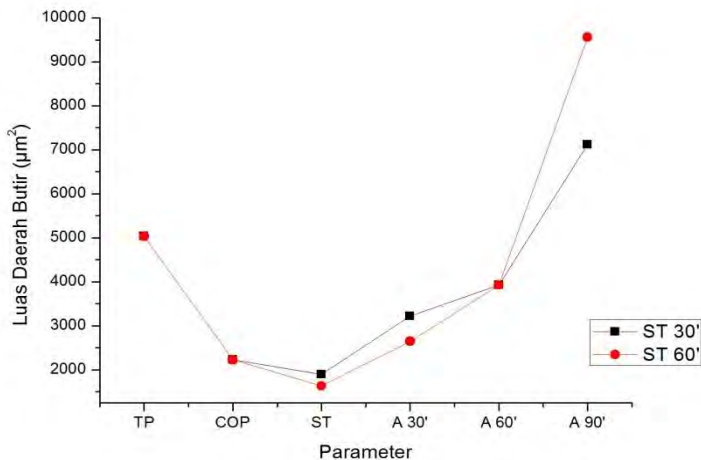
Gambar 4.29 Hasil Struktur Mikro *Copperized-AISI 1006 Solution Treatment* dengan Waktu Tahan 30 Menit dan *Aging* 90 Menit Perbesaran 1000

Fasa kedua tersebut teridentifikasi sebagai partikel Fe-Cu yang terjebak karena adanya proses perlakuan panas, sesuai dengan hasil pengujian SEM/EDX dan XRD. Proses *precipitation hardening* yang dilakukan tidak membentuk adanya presipitat Cu, namun membentuk partikel Fe-Cu pada batas butir dengan

matriks ferit (α Fe) hal tersebut dikarenakan batas kelarutan Cu yang rendah pada Fe seiring dengan menurunnya temperatur.

4.1.5.d Perbandingan Luas Daerah Batas Butir

Perhitungan untuk mencari luas daerah batas butir ini menggunakan metode *Heyn-Intercept*. Pada grafik terlihat adanya pengecilan luas daerah batas butir dari spesimen sebelum dan setelah dilakukannya *copperizing* pada baja AISI 1006, kemudian dilakukan proses pemanasan *solution treatment* 900°C luas daerah batas butir pun juga mengalami pengecilan baik dengan variasi waktu tahan 30 menit maupun 60 menit. Namun luas daerah batas butir untuk variasi waktu tahan 60 menit lebih tinggi yaitu mencapai 1415,38 μm^2 .



Gambar 4.30 Grafik Perubahan Luas Daerah Batas Butir Spesimen Setelah Perlakuan

Terlihat pada grafik adanya kenaikan luas daerah batas butir seiring dengan lamanya waktu tahan proses *aging*. Luas daerah batas butir terbesar terjadi pada spesimen *solution treatment* 60 menit dengan variasi waktu tahan *aging* 90 menit yaitu mencapai 9557,31 μm^2 .

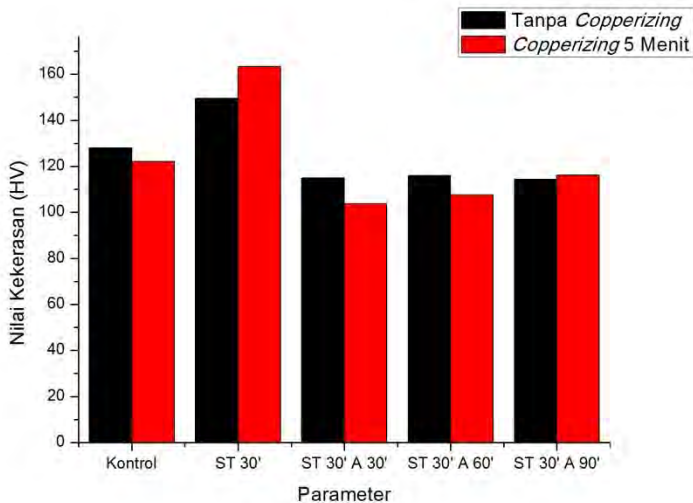
4.1.6 Pengujian *Microhardness* Vickers

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kekerasan dari sampel sebelum dan setelah *copperizing* diikuti dengan *precipitation hardening*. Uji kekerasan yang dipakai adalah Vickers *microhardness* dengan indenter piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan 136° , terbuat dari intan dengan pembebanan sebesar 1000 gf sesuai dengan ASTM E384. Pengujian ini dilakukan terhadap semua spesimen di tiga titik pada penampang melintangnya menggunakan *Microhardness Tester* Wilson 402 MVD. Hasil pengujian ditabulasikan pada **Tabel 4.10 dan 4.11** berikut.

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian *Hardness* Spesimen *Uncopperizing* dan *Copperizing* dengan *Solution Treatment* 30 Menit serta Variasi Waktu Tahan *Aging*

Variabel	Nilai Kekerasan (HV)	Variabel	Nilai Kekerasan (HV)
TP	127,86	Copperizing	122,13
ST 30'	149,4	ST 30'	163,26
ST 30' ; A 30'	115	ST 30' ; A 30'	103,8
ST 30' ; A 60'	116	ST 30' ; A 60'	107,67
ST 30' ; A 90'	114,3	ST 30' ; A 90'	116,06

Hasil nilai kekerasan pada **Tabel 4.10** tersebut direpresentasikan oleh grafik perbandingan nilai kekerasan untuk spesimen *uncopperized* dan *copperized* AISI 1006 yang telah melalui proses *solution treatment* dengan waktu tahan 30 menit dan proses *aging* dengan tiga variasi waktu tahan yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.31**.



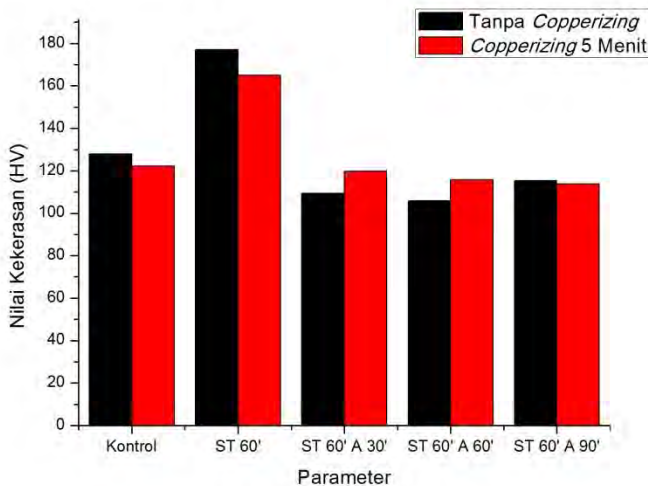
Gambar 4.31 Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan *Uncopperizing* dan *Copperizing* AISI 1006 dengan *Solution Treatment* 30 Menit serta Variasi Waktu Tahan *Aging*

Terlihat pada **Tabel 4.10** bahwa nilai Kekerasan untuk spesimen *uncopperized* dan *copperized* AISI 1006 mengalami peningkatan saat dilakukan *solution treatment* pada keduanya, namun terjadi penurunan kekerasan setelah proses *aging* dilakukan, seiring lamanya waktu tahan *aging* pada spesimen *copperized* AISI 1006 terjadi sedikit kenaikan nilai kekerasn. Nilai kekerasan tertinggi dicapai oleh spesimen *copperized* AISI 1006 dengan waktu tahan *solution treatment* 30 menit yang mencapai 163,26 HV. Nilai kekerasan terendah adalah 103,8 HV untuk spesimen *copperized* AISI 1006 *solution treatment* 30 menit dan *aging* 30 menit.

Tabel 4. 11 Hasil Pengujian *Hardness* Spesimen *Uncopperizing* dan *Copperizing* dengan *Solution Treatment* 60 Menit serta Variasi Waktu Tahan *Aging*

Variabel	Nilai Kekerasan (HV)	Variabel	Nilai Kekerasan (HV)
TP	127,86	Copperizing	122,13
ST 60'	177	ST 60'	164,96
ST 60' ; A 30'	109,5	ST 60' ; A 30'	119,76
ST 60' ; A 60'	105,8	ST 60' ; A 60'	115,75
ST 60' ; A 90'	115,2	ST 60' ; A 90'	113,9

Fenomena yang sama ditunjukkan oleh spesimen dengan variasi waktu tahan *solution treatment* 60 menit. Terjadi penurunan kekerasan setelah dilakukannya proses *aging* pada baja AISI 1006 baik untuk spesimen *uncopperized* maupun *copperized*. Nilai kekerasan yang tertinggi mencapai 177 HV untuk spesimen *uncopperized* AISI 1006 dengan *solution treatment* 60 menit.



Gambar 4.32 Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan *Uncopperizing* dan *Copperizing* AISI 1006 dengan *Solution Treatment* 60 Menit serta Variasi Waktu Tahan Aging

Dari data hasil pengujian kekerasan terlihat bahwa adanya penurunan angka kekerasan dari sampel sebelum dan setelah dilakukannya pemaduan dengan metode *copperizing*. Pemaduan dengan metode *copperizing* menurunkan angka kekerasan *microvickers* sebesar 5,73 HV. Peningkatan nilai kekerasan terjadi saat proses *solution treatment* namun mengalami penurunan kembali saat *aging*.

4.2 Pembahasan

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh waktu tahan proses *solution treatment* dan waktu tahan *aging* pada *copperized-AISI 1006* terhadap pengaruh penambahan tembaga, meliputi topografi permukaan, dan pengaruhnya terhadap pembentukan fasa ,struktur mikro,dan kekerasan baja setelah melalui proses *precipitation hardening*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *copperizing* baja AISI 1006 diikuti dengan proses *precipitation hardening* dengan variasi waktu tahan *solution treatment* dan *aging*. *Copperizings* sendiri merupakan sebuah metode pemaduan yang dilakukan dengan cara mendifusikan tembaga yang berada dalam keadaan cair ke dalam substrat baja.

Pengaruh variasi waktu tahan pada proses *solution treatment* terhadap mikro struktur *copperized-AISI 1006* adalah bahwa terbentuk adanya struktur mikro dominan ferit dengan orientasi butir iregular dan bentuk *randomly equiaxed*, serta terdapat struktur fasa kedua yang berwarna hitam gelap disepanjang garis batas butir dan terdistribusi diantara butir ferit (Elwazri,dkk,2008). Hal ini terbentuk pada kedua variasi waktu tahan *solution treatment*, namun untuk variasi waktu tahan 30 menit fasa kedua yang terbentuk tidak sejelas pada spesimen dengan waktu tahan 60 menit. Fasa kedua ini teridentifikasi sebagai partikel Fe-Cu. Hal ini didukung oleh hasil pengujian SEM/EDX terdapat unsur Fe dan Cu yang terdeteksi selain C, Al dan O. Unsur Fe merupakan komposisi yang dominan. Hasil *mapping* tembaga juga memperlihatkan adanya kecenderungan cluster tembaga untuk berkumpul pada daerah batas butir, hasil *spotting* juga menunjukkan terdapat kandungan unsur Fe dan Cu pada batas butir. Selain itu, hasil pengujian XRD menunjukkan adanya fasa baru yang terbentuk yaitu $\text{Fe}_{0.997}\text{Cu}_{0.003}$ sehingga dapat dikatakan bahwa fasa kedua yang terbentuk pada proses *solution treatment* merupakan partikel Fe-Cu yang terjebak pada batas butir akibat perlakuan panas.

Setelah dilakukan proses aging dengan tiga variasi waktu tahan terlihat adanya perbedaan pada struktur mikro yang terbentuk. Hasil metalografi menunjukkan bahwa setelah aging butir ferit tetap menjadi fasa yang dominan dengan warna putih terang namun orientasiinya tidak beraturan dan berbentuk sedikit memanjang. Fasa kedua juga terbentuk setelah dilakukannya aging ini, namun persebarannya tidak merata apabila dibandingkan dengan setelah solution treatment. Hasil pengujian SEM yang telah dilakukan menunjukkan komposisi unsur Fe, Cu dan C sebagai unsur dengan komposisi yang dominan dengan hasil mapping cluster tembaga cenderung pada batas butir. Perubahan fasa ditunjukkan oleh hasil XRD yaitu terbentuk fasa α Fe dan Cu dimana puncak yang terbentuk mengalami pergeseran dan penurunan tinggi intensitas. Munculnya puncak difraksi Cu diawali oleh menurunnya puncak Fe. Hal ini mengindikasikan adanya difusi atom Cu kedalam atom Fe (Christianto & Purwaningsih, 2013). Lamanya pendinginan yang terjadi saat aging menyebabkan atom Cu yang awalnya terjebak pada batas butir berdifusi keluar dan membentuk fasa tersendiri. Semakin tinggi energi thermal yang diberikan pada temperatur *aging* dan lamanya waktu tahan, maka difusi atom Cu yang terjadi semakin banyak. Atom Cu mengisi vakansi yang terdapat pada struktur Fe sehingga menyebabkan pertumbuhan ukuran kristal (Helmy & Fajarin, 2013).

Nilai kekerasan hasil *copperizing* lebih rendah dibandingkan dengan sebelum *copperizing*. Hal ini disebabkan karena pada proses tanpa perlakuan panas terdapat tegangan sisa, tegangan sisa inilah yang mempengaruhi harga kekerasan pada spesimen tanpa perlakuan panas. Nilai kekerasan spesimen menunjukkan nilai maksimum saat setelah mendapat perlakuan *solution treatment*, hal ini sesuai dengan pernyataan Callister, 2007 bahwa sebagian besar paduan tembaga tidak dapat dikeraskan dan dikuatkan dengan prosedur perlakuan panas, kecuali dengan *solid solution* dan *cold work* untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Sehingga nilai kekerasan yang didapatkan

setelah perlakuan *aging* menjadi lebih rendah. Penurunan nilai kekerasan pun juga dikarenakan oleh semakin besar ukuran butir (Rubijanto,2006).Setelah dilakukan proses *solution treatment* dan *aging* dengan variasi waktu tahan, luas daerah batas butir meningkat seiring lamanya waktu tahan. Perbesaran ukuran butir ini dikarenakan semakin lamanya waktu tahan maka butir memiliki waktu yang cukup untuk mengalami pertumbuhan,Struktur mikro dominan ferit juga berpengaruh terhadap nilai kekerasan baja AISI 1006. Fenomena yang sama juga ditunjukkan oleh baja *uncopperized*-AISI 1006 yakni kekerasan menurun setelah proses *aging*, maka hal ini menyatakan bahwa peningkatan sifat mekanik untuk AISI 1006 cukup dengan perlakuan *solution treatment* saja. Hal ini juga dikarenakan pada proses *precipitation hardening* yang dilakukan tidak membentuk adanya presipitat Cu, namun membentuk partikel Fe-Cu pada batas butir dengan matriks ferit (α Fe) hal tersebut dikarenakan batas kelarutan Cu yang rendah pada Fe seiring dengan menurunnyatemperatur.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Struktur mikro dari *copperized*-AISI 1006 yang dihasilkan setelah proses *precipitation hardening* mengalami perubahan, yakni terbentuk dominan matriks α -ferit dengan fasa kedua berupa partikel Fe-Cu pada batas butir.
2. Lamanya waktu tahan pada *solution treatment* dan waktu tahan *aging* menyebabkan naiknya luasan daerah batas butir. Luas daerah batas butir rata-rata yang paling tinggi ditunjukkan oleh *copperized*-AISI 1006 dengan waktu tahan *solution treatment* 60 menit dan *aging* 90 menit.
3. Pergeseran sudut difraksi dan perubahan intensitas pada puncak Fe seiring dengan naiknya variabel waktu tahan *solution treatment* dan *aging*, menandai terjadinya difusi Cu yang masuk kedalam Fe. Hal ini terbukti dengan terbentuknya fasa $\text{Cu}_{0,003}\text{Fe}_{0,997}$.
4. Nilai kekerasan maksimum dicapai setelah proses *solution treatment* untuk *uncopperized* dan *copperized* AISI 1006, sehingga proses *aging* tidak perlu dilakukan.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Pemakaian *muffle furnace* dengan temperatur stabil terutama saat proses *aging*.
2. Penggunaan bata tahan api pada *furnace* yang tahan temperatur tinggi dan *crucible grafit* yang tidak mudah terabrasi oleh temperatur tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International. 2000. Standard Specification for Plates, Carbon Steel, Structural Quality, Furnished to Chemical Composition Requirements
- Anon., 2003. *ASTM A830/A830M - 02*. Pennsylvania: ASTM International.
- ASM Metals Handbook, Vol 03 - Alloys Phase Diagrams
- ASM Metals Handbook, Vol 09 – Metallography An Introduction
- Avazkonandeh, M.H. dkk. 2008. *Effect Of Copper Content On The Microstructure And Mechanical Properties Of Multipass MMA, Low Alloy Steel Weld Metal Deposit*. Iran: Sadjad Institute of Higher Education
- Callister, William D. 2007. *"Materials Science and Engineering"*. Utah : John Wiley & Sons, Inc.
- Chen, Y.Z. dkk. 2007. *Rapid Solidification Of Bulk Undercooled Hypoperitectic Fe-Tembaga Alloy*. China : Northwestern Polytechnical University
- Chaniago, Firstiand Kevin. dkk. 2015. *Pengaruh Waktu Celup dan Temperatur Pemanasan Awal Proses Copperizing Plain Carbon Steel terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekaniknya*. Surabaya: ITS
- Christianto, Puguh dan Hariyati Purwaningsih. 2013. *Analisa Rietveld terhadap Transformasi Fasa ($\alpha \rightarrow \beta$) pada Solid Solution Ti-3 at.% Al pada Proses Mechanical Alloying dengan Variasi Milling Time*. Surabaya: ITS.
- Copper Development Association Inc., 2012. *The Copper Advantage: A Guide to Working With Copper and Copper Alloys*. New York: International Copper Association.
- Elwazri, A.M dkk. 2008. *Analysis of Copper Effect on Microstructures and Mechanical Properties in Microalloyed Steels*. Canada: University Street.
- Groisman, Alec, 2010. *Corrosion for Everybody*. New York: Springer.

- Helmy, Rizky Kurnia & Rindang Fajarin. 2013. *Pengaruh Waktu Milling dan Temperatur Sintering Pada Pembentukan Nanopartikel Fe₂TiO₅ Dengan Metode Mechanical Alloyin*. Surabaya: ITS.
- Jamal, Ilyas dan Haryadi Adma. 2012. *Analisa Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Kekuatan Sambungan Las Baja Karbon Tinggi*. Makassar: Universitas Hasanudin.
- Kishida, Koji. 1995. *Copper-Bearing High-Strength Sheet Steels*. Nippon Steel Technical Report No. 64.
- Liu, Jefferson Z, dkk. 2005. *Structure, Energetics, And Mechanical Stability Of Fe-Tembaga Bcc Alloys From First-Principles CalTembagulations*. USA : Northwestern University
- Marucci, M.L. & Hanejko, F.G., 2011. *Effect of Copper Alloy Addition Method on the Dimensional Response of Sintered Fe-Tembaga-C Steels*. Cinnaminson, NJ: Hoeganaes Corporation.
- Moline, K., Scott, J., International, D., Lasseigne, A., & Liu, S. (2002). *Effect of Copper in High Strength Low Alloy Steel*. Colorado: School Of Mines
- Molleda, F. dkk. 2007. "Copper coating of carbon steel by a furnace brazing process using brass as the braze". Madrid :Elvisier, 1044-5803.
- Mujahid, M. dkk. 1997. *HSLA-100 Steels: Influence of Aging Heat Treatment on Microstructure and Properties*. ASM International
- Mursalin, dkk. 2009. *Pengaruh Perlakuan Panas Aging Terhadap Perilaku Korosi Paduan Aluminium Seri 6061 dalam Larutan 0,05m HCl*. Surabaya: ITS.
- Panwar, Sanjay dkk. 2007. *Effect Of Cold Work And Aging On Mechanical Properties Of A Copper Bearing Microalloyed HSLA-100 (GPT) Steel*. India : Bull. Mater. Sci., Vol. 30, No. 2 Indian Academy of Sciences.
- Paryono, dkk. 2011. *Pengaruh Perlakuan Panas T6 Terhadap Kekerasan Pada Paduan Aluminium ADC12 Hasil Proses*

Thompson.S.W.,dkk.1998.*A New Model Of Interphase Precipitation In Copper-Containing Steels*.Colorado: Colorado School of Mines.

U.S. Geological Survey (USGS), 2009. *Copper - A Metal for the Ages*. Reston, VA: U.S. Department of Interior.

Xu, Y., Wang, D., Jin, Q. & Zhou, Y., 1993. Diffusion Behaviour of Fe-Tembaga Interface of Copper Brazed Double-wall Steel Tubes

Zhou, W.H. et al., 2014. Copper Precipitation and Its Impact on Mechanical Properties in A Low Carbon Microalloyed Steel Processed by A Three-Step Heat Treatment. *Materials and Design, Volume: 63*, pp.42-49.

- High Pressure Die Casting (HPDC)*. Semarang: Politeknik Negeri Semarang.
- Rubijanto. 2006. *Pengaruh Proses Pendinginan Paska Perlakuan Panasterhadap Uji Kekerasan (Vickers) dan Uji Tarik Pada Baja Tahan Karat 304 Produksi Pengecoran Logam Di Klaten*. Surakarta: UNIMUS
- Rassoul A. & El-Sayed M. 1997. *Effect Of Carbon On The Diffusion Of Copper In Different Carbon-Steels*. Egypt : University Of El-Mansoura.
- Rothman, S.J. dkk. 1968. *The Diffusion of Copper in Iron*. Washington DC: National Bureau of Standards.
- Ruddle, G.E., 2002. *Effects of Residuals in Carbon Steels*. Pennsylvania: American Iron and Steel Institute.
- Savage, dkk (1978). Intergranular Attack Of Steel by Molten Copper. Welding Research Supplement.
- Sekunowo, dkk. 2014. *Effect of Copper on Microstructure and Mechanical Properties of Construction Steel*. International Journal of Chemical, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol:8, pp 805-809
- Smith, W.F. 1993. *Foundations of Materials Science and Engineering*, New York : McGraw-Hill, Inc., 2nd Ed
- Suherman, I.W., 2003. *Ilmu Logam I*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS.
- Surdia, T. dan Saito, S., 1992, *Pengetahuan Bahan Teknik*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Suratman, Rochim., (1994): *Panduan Proses Perlakuan Panas*. Lembaga Penelitian ITB. Bandung
- Suroto, A. dan Sudibyo, B. 1983. *Ilmu Logam Metallurgy*. Solo: ATMI PRESS ATMI Michael College.
- Takaki, Setuo et.al. 2004. “*Effect of Copper on tensile Properties and grain refinement of steel and its Relation to Precipitation Behavior*”. Kobe : Materials Transaction Vol.45 No.7(2004).
- Taufiq, Tania Dan Akhmad A. Korda. 2010. *Studi Pengaruh Temperatur Aging Dan Orientasi Butiran Terhadap Sifat*

LAMPIRAN

Lampiran Perhitungan Difusi

Difusi Cu-Fe

- ✓ A phase → di bawah $T = 759^{\circ}\text{C}$; $D_0 = 8,6 \text{ cm}^2/\text{s}$
 $Q = 59,7 \text{ kcal/mol}$
- ✓ γ phase → di atas $T = 759^{\circ}\text{C}$; $D_0 = 1,8 \text{ cm}^2/\text{s}$
 $Q = 70,5 \text{ kcal/mol}$

Karena temperature copperitingberadapada temperature 1086°C , maka yang terjadi adalah γ phase.

$$\begin{aligned} D &= D_0 e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \\ &= 1,8 \text{ cm}^2/\text{se}^{-\left(\frac{70,5 \text{ kcal/mol}}{8,3114 \text{ J/molK} \cdot 1356 \text{ K}}\right)} \\ &= 1,8 \text{ cm}^2/\text{se}^{-26,264} \\ &= 7,06 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s} \end{aligned}$$

$$M_{\text{cu}} = 1206 \text{ gram}$$

$$V_{\text{cu}} = 150,86 \text{ cm}^3$$

$$P_{\text{cu}} = 8,03 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Konsentrasi Cu} = \frac{m}{Mr \text{ volume}} \cdot \frac{1000}{\text{volume}}$$

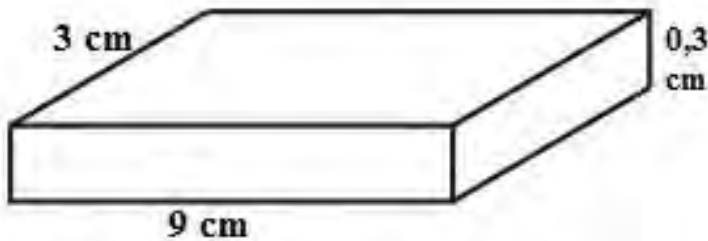
$$= \frac{1206 \text{ gram}}{63,56} \frac{1000}{150,86 \text{ cm}^3}$$

$$= 126,37 \text{ gr/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \checkmark J &= \frac{dm}{S \cdot dt} \\ &= \frac{1206 \text{ gram}}{61,2 \text{ cm}^2 \cdot 300 \text{ s}} \\ &= \frac{1206 \text{ gram}}{18360 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}} \\ &= 0,06568 \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \checkmark J_x &= -D \frac{dc}{dx} \\ 0,06568 \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{s} &= -7,06 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s} \frac{126,37 \text{ gram/cm}^3}{x} \\ X &= 1,35 \cdot 10^{-8} \text{ cm} \\ X &= 0,135 \text{ nm} \end{aligned}$$

AISI 1006



Lampiran Hasil Pengujian Komposisi OES

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 1 Material : CARBON STEEL
Customer : ADHA ISORI HARTATA Dimension : -
Lab-no : UJI BAHAN Heat-no : -
Operator : ELHAM Ka. Laboratorium : M.THORIQ WAHYUDI
Date : 3/31/2015

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.5	0.0376	0.0205	0.211	0.0094	0.0089	0.0304	< 0.0050
2	99.5	0.0373	0.0199	0.208	0.0092	0.0079	0.0253	< 0.0050
3	99.5	0.0324	0.0195	0.211	0.0086	0.0072	0.0270	< 0.0050
Ave	99.5	0.0358	0.0200	0.210	0.0091	0.0080	0.0276	< 0.0050

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0305	0.0464	< 0.0050	0.0363	0.0103	0.0086	< 0.0050	< 0.0050
2	0.0308	0.0449	< 0.0050	0.0377	0.0122	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
3	0.0264	0.0450	< 0.0050	0.0384	0.0196	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
Ave	0.0292	0.0454	< 0.0050	0.0375	0.0140	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050

	Pb
1	< 0.0050
2	< 0.0050
3	< 0.0050
Ave	< 0.0050

OES Chemical Results

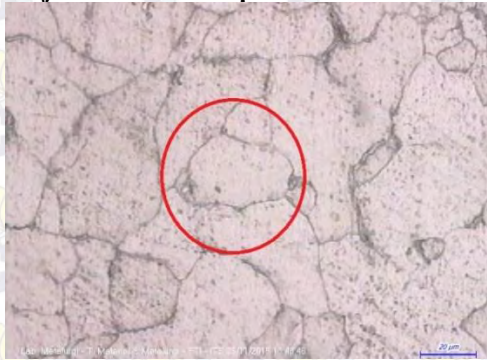
Sample ID : NORMALIZING Material : CARBON STEEL
Customer : Sdr. TIO (TEKNIK MATERIAL & MDimension :) -
Lab-no. : UJI BAHAN Heat-no. : -
Operator : ELHAM Ka. Laboratorium : M. THORIQ WAHYUDI
Date: 9/14/2015

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.3	0.0098	0.0591	0.174	0.0406	0.0326	0.0320	0.0072
2	99.4	0.0062	0.0422	0.176	0.0316	0.0236	0.0286	0.0063
3	99.2	0.0117	0.0664	0.170	0.0329	0.0281	0.0382	0.0090
4	99.3	0.0126	0.0645	0.173	0.0318	0.0253	0.0336	0.0093
Ave	99.3	0.0112	0.0573	0.175	0.0335	0.0268	0.0334	0.0081
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0697	0.0405	0.0016	0.157	0.0017	0.0247	0.0015	0.0094
2	0.0559	0.0395	0.0015	0.115	0.0090	0.0159	0.0017	0.0142
3	0.0810	0.0443	0.0016	0.136	< 0.0010	0.119	< 0.0010	0.0189
4	0.0740	0.0425	0.0013	0.122	< 0.0010	0.0755	< 0.0010	0.0036
Ave	0.0697	0.0417	0.0015	0.128	0.0021	0.0615	0.0012	0.0101
	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
1	0.0018	0.0040	< 0.0001	0.0017	0.0041	< 0.0001	0.0038	< 0.0005
2	0.0018	0.0028	< 0.0001	0.0012	0.0040	< 0.0001	0.0011	< 0.0005
3	0.0081	0.0028	< 0.0001	0.0021	0.0044	< 0.0001	0.0039	0.0008
4	0.0031	0.0027	< 0.0001	0.0017	0.0035	< 0.0001	0.0043	< 0.0005
Ave	0.0037	0.0030	< 0.0001	0.0016	0.0040	< 0.0001	0.0031	< 0.0005
	N	Se	Sb	Ta				
1	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
2	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
3	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
4	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
Ave	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				

Lampiran Perhitungan Ukuran Butir dengan Metode Heyn Intercept

1. Spesimen Baja AISI 1006 Tanpa Perlakuan



Gambar 1. Struktur Mikro AISI 1006 Tanpa Perlakuan Perbesaran 500x

$N = 8$

$D = 79,8 \text{ mm}$

$M = 500$

$\pi = 3,14$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir

D = Diameter lingkaran

M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$Kl = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$Kl = \frac{3,14 \times 79,8}{500}$$

$$Kl = 0,5011 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{KII}$$

$$P_L = \frac{8}{0,5011}$$

$$P_L = 15,9648$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{15,9648}$$

$$L_3 = 0,0626$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} L_3) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} 0,0626) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (-1,2034) - 3,298\}$$

$$G = \{7,9976 - 3,298\}$$

$$G = 4,6996$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 Tanpa Perlakuan adalah 4,6996. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:



TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	N_g Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{D} Average Diameter		\bar{T} Mean Intercept		\bar{N}_L
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.53	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	58.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.00
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22448.4	0.000045	44.5	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

$$\frac{4,6996 - 4,5}{5,0 - 4,5} = \frac{x - 5703}{4032 - 5703}$$

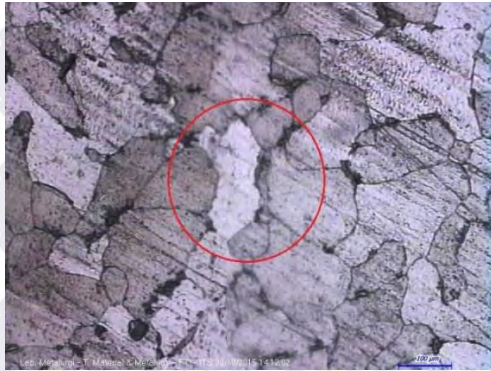
$$\frac{0,1996}{0,5} = \frac{x - 5703}{-1671}$$

$$-667,0632 = x - 5703$$

$$x = 5035,93 \text{ m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Tanpa Perlakuan 5035,93 μm²

2. Spesimen Baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit



Gambar 2. Struktur Mikro AISI 1006 Perlakuan *Copperizing* 5 Menit
Perbesaran 500x

$$N = 11$$

$$D = 79,8 \text{ mm}$$

$$M = 500$$

$$\pi = 3,14$$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir

D = Diameter lingkaran

M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{ll} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{ll} = \frac{3,14 \times 79,8}{500}$$

$$K_{ll} = 0,5011 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{K_{ll}}$$

$$P_L = \frac{12}{0,5011}$$

$$P_L = 23,9473$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{23,9473}$$

$$L_3 = 0,0417$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} L_3) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} 0,0417) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (-1,3798) - 3,298\}$$

$$G = \{9,1701 - 3,298\}$$

$$G = 5,872$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit adalah 5,872. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{5,872 - 5,5}{6,0 - 5,5} = \frac{x - 2851}{2016 - 2851}$$

$$\frac{0,372}{0,5} = \frac{x - 2851}{-835}$$

$$-621,24 = x - 2851$$

$$x = 2229,76 \text{ m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit $2229,76 \mu\text{m}^2$

3. Spesimen Baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit



Gambar 3. Struktur Mikro AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit Perbesaran 500x

$N = 13$

$D = 79,8 \text{ mm}$

$M = 500$

$\pi = 3,14$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir

D = Diameter lingkaran

M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{II} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{II} = \frac{3,14 \times 79,8}{500}$$

$$K_{II} = 0,5011 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{KII}$$

$$P_L = \frac{13}{0,5011}$$

$$P_L = 25,942$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{25,942}$$

$$L_3 = 0,0385$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} L_3) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} 0,0385) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (-1,4145) - 3,298\}$$

$$G = \{9,4006 - 3,298\}$$

$$G = 6,1026$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit adalah 6,1026 Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{6,1026 - 6}{6,5 - 6,0} = \frac{x - 2016}{1426 - 2016}$$

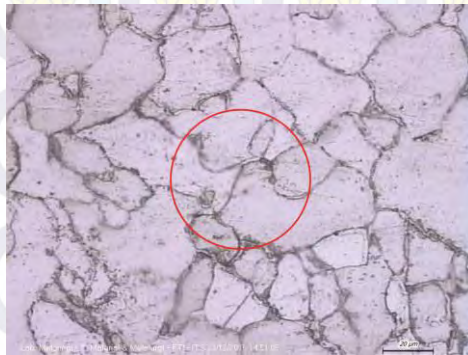
$$\frac{0,1026}{0,5} = \frac{x - 2016}{-590}$$

$$-121,068 = x - 2016$$

$$x = 1894,932 \text{ m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit adalah 1894,932 μm^2

4. Spesimen Kontrol Baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 30 Menit



Gambar 4. Struktur Mikro AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit ; *Aging* 500°C dengan Waktu Tahan 30 Menit Perbesaran 500x

$$N = 10$$

$$D = 79,8 \text{ mm}$$

$$M = 500$$

$$\pi = 3,14$$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir

D = Diameter lingkaran

M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$Kll = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$Kll = \frac{3,14 \times 79,8}{500}$$

$$Kll = 0,5011 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{Kll}$$

$$P_L = \frac{10}{0,5011}$$

$$P_L = 19,956$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{19,956}$$

$$L_3 = 0,0501$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} L_3) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} 0,0501) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (-1,3001) - 3,298\}$$

$$G = \{8,6404 - 3,298\}$$

$$G = 5,3424$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006
Copperizing 5 Menit , Solution Treatment 900°C dengan Waktu

Tahan 30 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 30 Menit adalah 5,3424. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{5,3424 - 5}{5,5 - 5} = \frac{x - 4032}{2851 - 4032}$$

$$\frac{0,3424}{0,5} = \frac{x - 4032}{-1181}$$

$$-808,748 = x - 4032$$

$$x = 3223,25 \text{ m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 30 Menit adalah 3223,25 μm^2

5. Spesimen Kontrol Baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 60 Menit



Gambar 5. Struktur Mikro AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 60 Menit Perbesaran 500x

$$N = 9$$

$$D = 80 \text{ mm}$$

$$M = 500$$

$$\pi = 3,14$$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir

D = Diameter lingkaran

M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{ll} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{ll} = \frac{3,14 \times 79,8}{500}$$

$$K_{ll} = 0,5011 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{K_{ll}}$$

$$P_L = \frac{9}{0,5011}$$

$$P_L = 17,9604$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{17,9604}$$

$$L_3 = 0,0556$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} L_3) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} 0,0556) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (-1,2549) - 3,298\}$$

$$G = \{8,3398 - 3,298\}$$

$$G = 5,0418$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 60 Menit adalah 5,0418. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{5,0418 - 5,0}{5,5 - 5,0} = \frac{x - 4032}{2851 - 4032}$$

$$\frac{0,0418}{0,5} = \frac{x - 2851}{-1181}$$

$$-98,7316 = x - 4032$$

$$x = 3933,26 \text{ } \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 60 Menit adalah 3933,26 μm^2

6. Spesimen Kontrol Baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 90 Menit



Gambar 6. Struktur Mikro AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 90 Menit Perbesaran 500x

$$N = 8$$

$$D = 79,8 \text{ mm}$$

$$M = 500$$

$$\pi = 3,14$$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir

D = Diameter lingkaran

M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{ll} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{ll} = \frac{3,14 \times 79,8}{500}$$

$$K_{ll} = 0,5011 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{KII}$$

$$P_L = \frac{8}{0,5011}$$

$$P_L = 15,9648$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{15,9648}$$

$$L_3 = 0,0626$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} L_3) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} 0,0626) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (-1,2034) - 3,298\}$$

$$G = \{7,997 - 3,298\}$$

$$G = 4,6996$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 90 Menit adalah 4,6996. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{4,6996 - 4,5}{4,5 - 4} = \frac{x - 8065}{5703 - 8065}$$

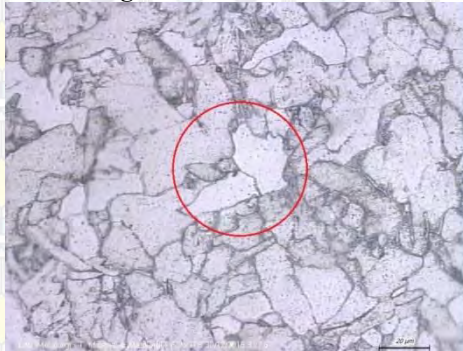
$$\frac{0,1996}{0,5} = \frac{x - 8065}{-2362}$$

$$-942,910 = x - 8065$$

$$x = 7122,089 \text{ m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 30 Menit; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 90 Menit adalah 7122,089 μm^2

7. Spesimen Baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit



Gambar 7. Struktur Mikro AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit Perbesaran 500x

$$N = 14$$

$$D = 79,8 \text{ mm}$$

$$M = 500$$

$$\pi = 3,14$$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir

D = Diameter lingkaran

M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{II} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{II} = \frac{3,14 \times 79,8}{500}$$

$$K_{II} = 0,5011 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{K_{II}}$$

$$P_L = \frac{14}{0,5011}$$

$$P_L = 27,938$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{27,938}$$

$$L_3 = 0,0357$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} L_3) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} 0,0357) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (-1,4473) - 3,298\}$$

$$G = \{9,6185 - 3,298\}$$

$$G = 6,3205$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit adalah 6,3205. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{6,3205 - 6,0}{6,5 - 6,0} = \frac{x - 2016}{1426 - 2016}$$

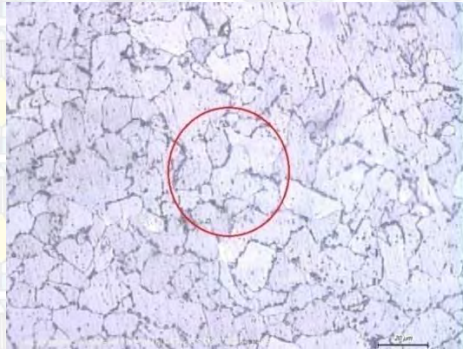
$$\frac{0,3205}{0,5} = \frac{x - 2016}{-590}$$

$$-378,19 = x - 2016$$

$$x = 1637,81 \text{ m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit adalah 1637,81 μm^2

8. Spesimen Kontrol Baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 30 Menit



Gambar 8. Struktur Mikro AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 30 Menit Perbesaran 500x

N = 11

D = 79,8 mm

M = 500

$$\pi = 3,14$$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir

D = Diameter lingkaran

M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{ll} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{ll} = \frac{3,14 \times 79,8}{500}$$

$$K_{ll} = 0,5011 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{K_{ll}}$$

$$P_L = \frac{11}{0,5011}$$

$$P_L = 21,9517$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{21,9517}$$

$$L_3 = 0,0455$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} L_3) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} 0,0455) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (-1,3419) - 3,298\}$$

$$G = \{8,9184 - 3,298\}$$

$$G = 5,6204$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 30 Menit adalah 5,6204. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{5,6204 - 5,5}{6,0 - 5,5} = \frac{x - 2851}{2016 - 2851}$$

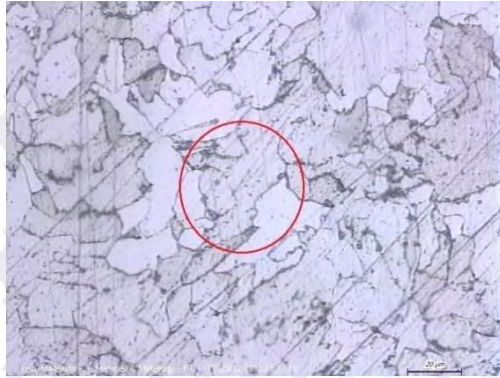
$$\frac{0,1204}{0,5} = \frac{x - 2851}{-835}$$

$$-201,068 = x - 2851$$

$$x = 2649,99 \text{ m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 30 Menit adalah 2649,99 μm^2

9. Spesimen Kontrol Baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 60 Menit



Gambar 9. Struktur Mikro AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 60 Menit Perbesaran 500x

$$\begin{aligned} N &= 9 \\ D &= 79,8 \text{ mm} \\ M &= 500 \\ \pi &= 3,14 \end{aligned}$$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir
D = Diameter lingkaran
M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{II} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{II} = \frac{3,14 \times 79,8}{500}$$

$$K_{II} = 0,5011 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P = \frac{N}{K_{II}}$$

$$P = \frac{9}{0,5011}$$

$$P = 17,9604$$

- Menentukan Nilai L_3

$$= \frac{1}{P_L}$$

$$= \frac{1}{17,9604}$$

$$_3 = 0,0556$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} L_3) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} 0,0556) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (-1,2549) - 3,298\}$$

$$G = \{8,3398 - 3,298\}$$

$$G = 5,0418$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 60 Menit adalah 5,0418. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{5,0418 - 5,0}{5,5 - 5,0} = \frac{x - 4032}{2851 - 4032}$$

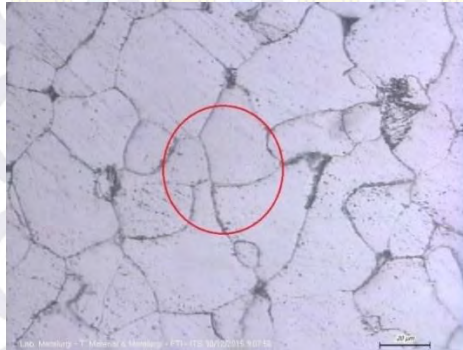
$$\frac{0,0418}{0,5} = \frac{x - 4032}{-1217}$$

$$-101,741 = x - 4032$$

$$x = 3930,25 \text{ m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 60 Menit adalah 3930,25 μm^2

10. Spesimen Kontrol Baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 90 Menit



Gambar 10. Struktur Mikro AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 30 Menit Perbesaran 500x

N = 7
D = 79,8 mm
M = 500
 $\pi = 3,14$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir
D = Diameter lingkaran
M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{II} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{II} = \frac{3,14 \times 79,8}{500}$$

$$K_{II} = 0,5011 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P = \frac{N}{K_{II}}$$

$$P = \frac{7}{0,5011}$$

$$P = 13,9692$$

- Menentukan Nilai L_3

$$= \frac{1}{P_L}$$

$$= \frac{1}{13,9692}$$

$$L_3 = 0,0715$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} L_3) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (\log_{10} 0,0715) - 3,298\}$$

$$G = \{-6,6457 (-1,1456) - 3,298\}$$

$$G = \{7,6139 - 3,298\}$$

$$G = 4,3159$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit ; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 30 Menit adalah 4,3159. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{4,3159 - 4,0}{4,5 - 4,0} = \frac{x - 8065}{5703 - 8065}$$

$$\frac{0,3159}{0.5} = \frac{x - 8065}{-2362}$$

$$-1492,31 = x - 8065$$

$$x = 9557,31 \text{ m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit , *Solution Treatment* 900°C dengan Waktu Tahan 60 Menit; *Aging* 450°C dengan Waktu Tahan 90 Menit adalah 9557,31 μm^2

Lampiran Perhitungan Ukuran dan Regangan Kristal dengan Schererr Formula

Untuk menghitung microstrain kristal pada hasil pengujian XRD , digunakan rumus sebagai berikut :

$$B^2 = B_M^2 - B_S^2$$

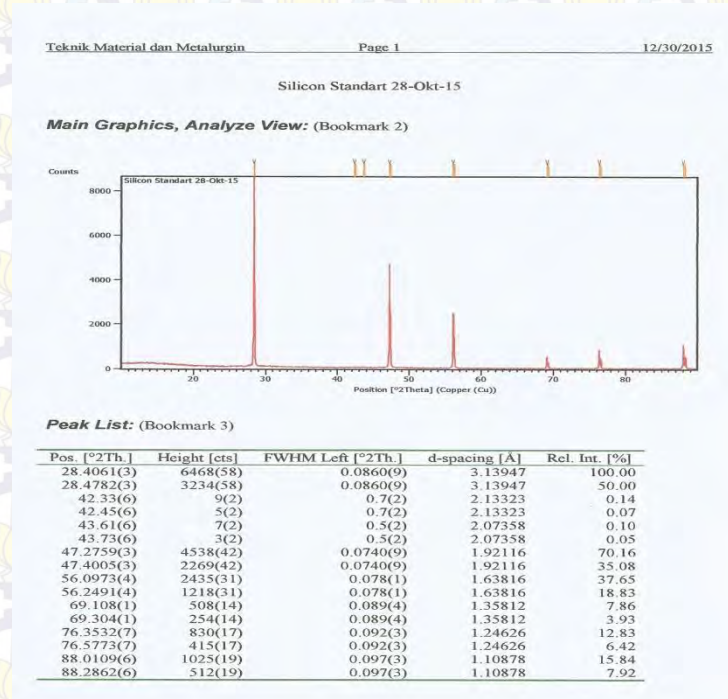
Dimana :

B = FWHM dalam radian

B_M = FWHM Material Uji

B_S = FWHM Material Standart

Silicon Standart



Kemudian nilai B yang didapatkan dimasukkan kedalam rumus berikut untuk mencari nilai t dan ε :

$$t = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta_B}$$

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

Dimana :

$\lambda = 1,54060$

t = Ukuran Kristal

ε = Regangan Kristal

1. Baja AISI 1006 Tanpa Perlakuan

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6563	487.49	0.0836	2.02926	100.00
64.9553	68.47	0.2007	1.43572	14.04
82.3476	73.89	0.5353	1.17102	15.16

$$B_m = 0,0836 \times \frac{\pi}{180} = 0,001458 \text{ rad}$$

$$B_s = 0,0860 \times \frac{\pi}{180} = 0,0015 \text{ rad}$$

Mencari Nilai B :

$$B^2 = B_m^2 - B_s^2$$

$$B^2 = 0,001458^2 - 0,0015^2$$

$$B^2 = 0,000002125 - 0,00000225$$

$$B^2 = |-0,000000125|$$

$$B = 3,5247 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

Mencari nilai t :

$$t = \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta_B}$$

$$t = \frac{0,9 \cdot 1,54060}{0,00035247 \cdot \cos 22,32815}$$

$$t = 4252,6303 \text{ Å}$$

$$t = 4,2526 \cdot 10^{-7} \mu\text{m}$$

Mencari Nilai ε :

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$0,00035247 = 4\varepsilon \frac{\sin 22,32815}{\cos 22,32815}$$

$$\varepsilon = \frac{0,00035247}{1,6428}$$

$$\varepsilon = \mathbf{0,0002145}$$

2. Baja AISI 1006 Copperizing5 Menit

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6594	585.40	0.2342	2.02913	100.00
64.9733	92.37	0.2676	1.43536	15.78
82.2498	124.25	0.3346	1.17217	21.22

$$B_m = 0,2342 \times \frac{\pi}{180} = 0,004085 \text{ rad}$$

$$B_s = 0,0860 \times \frac{\pi}{180} = 0,0015 \text{ rad}$$

Mencari Nilai B :

$$B^2 = B_m^2 - B_s^2$$

$$B^2 = 0,004085^2 - 0,0015^2$$

$$B^2 = 0,00001669 - 0,00000225$$

$$B^2 = 0,00001444$$

$$\mathbf{B = 0,0038}$$

Mencari nilai t :

$$t = \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta_B}$$

$$t = \frac{0,9 \cdot 1,54060}{0,0038 \cdot \cos 22,3297}$$

$$t = \frac{1,38654}{0,00351504}$$

$$t = 394,459 \text{ Å}$$

$$\mathbf{t = 0,03944 \text{ } \mu\text{m}}$$

Mencari Nilai ε :

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$0,0038 = 4\varepsilon \frac{\sin 22,3297}{\cos 22,3297}$$

$$\varepsilon = \frac{0,0038}{1,6429}$$

$$\varepsilon = \mathbf{0,002312}$$

3. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit ; Solution Treatment 900°C Holding Time 30 Menit

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.5051	622.38	0.1224	2.03412	86.21
44.6243	721.92	0.0612	2.03400	100.00
64.9855	78.38	0.6528	1.43393	10.86
82.2270	100.33	0.8160	1.17146	13.90

$$B_m = 0,0612 \times \frac{\pi}{180} = 0,0019676 \text{ rad}$$

$$B_s = 0,0860 \times \frac{\pi}{180} = 0,0015 \text{ rad}$$

Mencari Nilai B :

$$B^2 = B_m^2 - B_s^2$$

$$B^2 = 0,0010676^2 - 0,0015^2$$

$$B^2 = 0,000003871 - 0,00000225$$

$$B^2 = 0,0000011102$$

$$\mathbf{B = 0,001053 \text{ rad}}$$

Mencari nilai t :

$$t = \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta_B}$$

$$t = \frac{0,9 \cdot 1,54060}{0,00105 \cdot \cos 22,31215}$$

$$t = \frac{1,38654}{0,0009713}$$

$$t = 1427,509 \text{ \AA}$$

$$t = 0,1427 \text{ \mu m}$$

Mencari Nilai ε :

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$0,00105 = 4\varepsilon \frac{\sin 22,31215}{\cos 22,31215}$$

$$\varepsilon = \frac{0,00105}{1,6415}$$

$$\varepsilon = 0,0006396$$

4. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit ; Solution Treatment 900°C Holding Time 60 Menit

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.2287	115.81	0.1673	2.09291	20.06
44.5880	577.23	0.3011	2.03221	100.00
64.7224	72.30	0.5353	1.44032	12.53
82.2766	144.47	0.3346	1.17185	25.03

$$B_m = 0,3011 \times \frac{\pi}{180} = 0,005252 \text{ rad}$$

$$B_s = 0,0860 \times \frac{\pi}{180} = 0,0015 \text{ rad}$$

Mencari Nilai B :

$$B^2 = B_m^2 - B_s^2$$

$$B^2 = 0,005252^2 - 0,0015^2$$

$$B^2 = 0,000002758 - 0,00000225$$

$$B^2 = 0,000002533$$

$$B = 0,005033 \text{ rad}$$

Mencari nilai t :

$$t = \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta_B}$$

$$t = \frac{0,9 \cdot 1,54060}{0,005033 \cdot \cos 22,294}$$

$$t = \frac{1,38654}{0,00465678}$$

$$t = 297,7465 \text{ \AA}$$

$$t = \mathbf{0,02977 \text{ }\mu\text{m}}$$

Mencari Nilai ε :

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$0,005033 = 4\varepsilon \frac{\sin 22,294}{\cos 22,294}$$

$$\varepsilon = \frac{0,005033}{1,6400}$$

$$\varepsilon = \mathbf{0,003068}$$

5. Baja AISI 1006 Copperizing5 Menit ; Solution Treatment 900°C Holding Time 30 Menit; Aging 450°C Holding Time 30 Menit

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7593	69.32	0.3346	2.11478	25.93
44.3491	267.40	0.2007	2.04260	100.00
64.7906	43.69	0.5353	1.43897	16.34
65.7933	34.75	0.1004	1.41945	13.00
82.1669	58.71	0.5353	1.17314	21.96

$$B_m = 0,2007 \times \frac{\pi}{180} = 0,0035 \text{ rad}$$

$$B_s = 0,0860 \times \frac{\pi}{180} = 0,0015 \text{ rad}$$

Mencari Nilai B :

$$B^2 = B_m^2 - B_s^2$$

$$B^2 = 0,0035^2 - 0,0015^2$$

$$B^2 = 0,000012257 - 0,00000225$$

$$B^2 = 0,0000010077$$

$$B = 0,003163 \text{ rad}$$

Mencari nilai t :

$$t = \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta_B}$$

$$t = \frac{0,9 \cdot 1,54060}{0,003163 \cdot \cos 22,17455}$$

$$t = \frac{1,38654}{0,0029205}$$

$$t = 474,761 \text{ Å}$$

$$t = 0,04747 \text{ μm}$$

Mencari Nilai ε :

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$0,003163 = 4\varepsilon \frac{\sin 22,17455}{\cos 22,17455}$$

$$\varepsilon = \frac{0,003163}{1,6302}$$

$$\varepsilon = 0,0019402$$

6. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit ; Solution Treatment 900°C Holding Time 30 Menit; Aging 450°C Holding Time 60 Menit

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.5728	1252.58	0.0836	2.03287	100.00
64.9540	26.05	0.8029	1.43574	2.08
82.1830	120.52	0.2007	1.17295	9.62

$$B_m = 0,0836 \times \frac{\pi}{180} = 0,001458 \text{ rad}$$

$$B_s = 0,0860 \times \frac{\pi}{180} = 0,0015 \text{ rad}$$

Mencari Nilai B :

$$B^2 = B_m^2 - B_s^2$$

$$B^2 = 0,001458^2 - 0,0015^2$$

$$B^2 = 0,000002126 - 0,00000225$$

$$B^2 = |0,000000124236|$$

$$B = 0,000352 \text{ rad}$$

Mencari nilai t :

$$t = \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta_B}$$

$$t = \frac{0,9 \cdot 1,54060}{0,000352 \cdot \cos 22,2864}$$

$$t = \frac{1,38654}{0,0003257}$$

$$t = 4257,107 \text{ \AA}$$

$$t = 0,04257 \text{ \mu m}$$

Mencari Nilai ε :

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$0,000352 = 4\varepsilon \frac{\sin 22,2864}{\cos 22,2864}$$

$$\varepsilon = \frac{0,000352}{1,6394}$$

$$\varepsilon = 0,0002147$$

7. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit ; Solution Treatment 900°C Holding Time 30 Menit; Aging 450°C Holding Time 90 Menit

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.1324	228.45	0.2007	2.09735	48.82

44.4373	467.89	0.2342	2.03875	100.00
50.2106	61.35	0.2007	1.81703	13.11
64.8186	26.06	0.6691	1.43841	5.57
77.5646	25.38	0.1224	1.22980	5.43
82.1596	53.54	0.5353	1.17322	11.44

$$B_m = 0,2342 \times \frac{\pi}{180} = 0,004085 \text{ rad}$$

$$B_s = 0,0860 \times \frac{\pi}{180} = 0,0015 \text{ rad}$$

Mencari Nilai B :

$$\begin{aligned}
 B^2 &= B_m^2 - B_s^2 \\
 B^2 &= 0,004085^2 - 0,0015^2 \\
 B^2 &= 0,00001669 - 0,00000225 \\
 B^2 &= 0,00001444 \\
 \mathbf{B} &= \mathbf{0,0038 \text{ rad}}
 \end{aligned}$$

Mencari nilai t :

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta_B} \\
 t &= \frac{0,9 \cdot 1,54060}{0,0038 \cdot \cos 22,21865} \\
 t &= \frac{1,38654}{0,003517} \\
 t &= 394,239 \text{ \AA} \\
 \mathbf{t} &= \mathbf{0,03942 \text{ }\mu\text{m}}
 \end{aligned}$$

Mencari Nilai ε :

$$\begin{aligned}
 B &= 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \\
 0,0038 &= 4\varepsilon \frac{\sin 22,21865}{\cos 22,21865} \\
 \varepsilon &= \frac{0,0038}{1,6338} \\
 \mathbf{\varepsilon} &= \mathbf{0,002325}
 \end{aligned}$$

**8. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit ; Solution Treatment
900°C Holding Time 60 Menit; Aging 450°C Holding Time
30 Menit**

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.8493	105.67	0.2676	2.11055	49.84
44.2401	212.02	0.1673	2.04738	100.00
64.7090	30.93	0.5353	1.44058	14.59
81.9651	58.79	0.3346	1.17551	27.73

$$B_m = 0,1673 \times \frac{\pi}{180} = 0,002918 \text{ rad}$$

$$B_s = 0,0860 \times \frac{\pi}{180} = 0,0015 \text{ rad}$$

Mencari Nilai B :

$$\begin{aligned}
 B^2 &= B_m^2 - B_s^2 \\
 B^2 &= 0,002918^2 - 0,0015^2 \\
 B^2 &= 0,000008514 - 0,00000225 \\
 B^2 &= 0,000006264 \\
 B &= \mathbf{0,0025029 \text{ rad}}
 \end{aligned}$$

Mencari nilai t :

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta_B} \\
 t &= \frac{0,9 \cdot 1,54060}{0,0025029 \cdot \cos 22,12005} \\
 t &= \frac{1,38654}{0,0023186} \\
 t &= 598,0074 \text{ Å} \\
 t &= \mathbf{0,0598 \text{ } \mu\text{m}}
 \end{aligned}$$

Mencari Nilai ε :

$$\begin{aligned}
 B &= 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \\
 0,0025029 &= 4\varepsilon \frac{\sin 22,12005}{\cos 22,12005}
 \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{0,0025029}{1,6258}$$

$$\varepsilon = \mathbf{0,001539}$$

9. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit ; Solution Treatment 900°C Holding Time 60 Menit; Aging 450°C Holding Time 60 Menit

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6164	217.61	0.2342	2.03098	100.00
64.0729	16.18	0.2676	1.45334	7.43
64.8880	37.71	0.5353	1.43704	17.33
82.3198	49.30	0.5353	1.17135	22.65

$$B_m = 0,2342 \times \frac{\pi}{180} = 0,004085 \text{ rad}$$

$$B_s = 0,0860 \times \frac{\pi}{180} = 0,0015 \text{ rad}$$

Mencari Nilai B :

$$B^2 = B_m^2 - B_s^2$$

$$B^2 = 0,004085^2 - 0,0015^2$$

$$B^2 = 0,00001669 - 0,00000225$$

$$B^2 = 0,00001444$$

$$B = \mathbf{0,0038 \text{ rad}}$$

Mencari nilai t :

$$t = \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta_B}$$

$$t = \frac{0,9 \cdot 1,54060}{0,0038 \cdot \cos 22,3082}$$

$$t = \frac{1,38654}{0,003515}$$

$$t = 394,463 \text{ Å}$$

$$t = \mathbf{0,03944 \text{ } \mu\text{m}}$$

Mencari Nilai ε :

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$0,0038 = 4\varepsilon \frac{\sin 22,23082}{\cos 22,3082}$$

$$\varepsilon = \frac{0,0038}{1,6411}$$

$$\varepsilon = \mathbf{0,0023155}$$

10. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit ; Solution Treatment 900°C Holding Time 60 Menit; Aging 450°C Holding Time 90 Menit

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7942	98.09	0.2676	2.11314	56.44
44.3906	173.78	0.2007	2.04079	100.00
82.1031	70.14	0.2007	1.17389	40.36

$$B_m = 0,2676 \times \frac{\pi}{180} = 0,004668 \text{ rad}$$

$$B_s = 0,0860 \times \frac{\pi}{180} = 0,0015 \text{ rad}$$

Mencari Nilai B :

$$B^2 = B_m^2 - B_s^2$$

$$B^2 = 0,004085^2 - 0,0015^2$$

$$B^2 = 0,00002179 - 0,00000225$$

$$B^2 = 0,00001954$$

$$\mathbf{B = 0,00442 \text{ rad}}$$

Mencari nilai t :

$$t = \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta_B}$$

$$t = \frac{0,9 \cdot 1,54060}{0,00442 \cdot \cos 22,1953}$$

$$t = \frac{1,38654}{0,004092}$$

$$t = 338,8416 \text{ \AA}$$

$$t = \mathbf{0,0338 \text{ \mu m}}$$

Mencari Nilai ε :

$$B = 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$0,00442 = 4\varepsilon \frac{\sin 22,1953}{\cos 22,1953}$$

$$\varepsilon = \frac{0,00442}{1,63198}$$

$$\varepsilon = \mathbf{0,002708}$$

Lampiran Kode JCPDS Hasil Pengujian XRD

Name and formula

Reference code:	00-052-0513
Compound name:	Iron
Common name:	γ -Fe, austenite
Empirical formula:	Fe
Chemical formula:	Fe

Crystallographic parameters

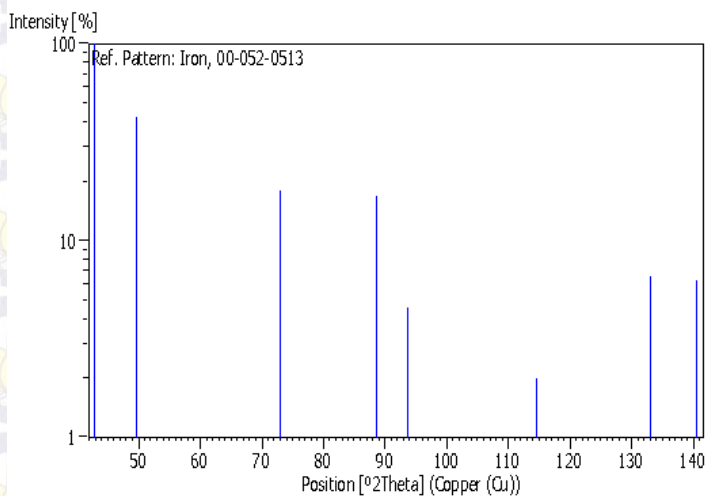
Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	225
a (Å):	3.6599
b (Å):	3.6599
c (Å):	3.6599
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Calculated density (g/cm ³):	7.57
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	49.02
Z:	4.00
RIR:	7.98

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.11300	42.760	100.0

2	2	0	0	1.83000	49.787	42.8
3	2	2	0	1.29400	73.066	17.9
4	3	1	1	1.10350	88.542	16.8
5	2	2	2	1.05650	93.623	4.6
6	4	0	0	0.91500	114.674	2.0
7	3	3	1	0.83960	133.115	6.6
8	4	2	0	0.81840	140.517	6.3

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 00-001-1241

Compound name: Copper

Empirical formula: Cu

Chemical formula: Cu

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic

Space group: Fm-3m

Space group number: 225

a (Å): 3.6077

b (Å): 3.6077

c (Å): 3.6077

Alpha (°): 90.0000

Beta (°): 90.0000

Gamma (°): 90.0000

Measured density (g/cm³): 8.95

Volume of cell (10⁶ pm³): 46.96

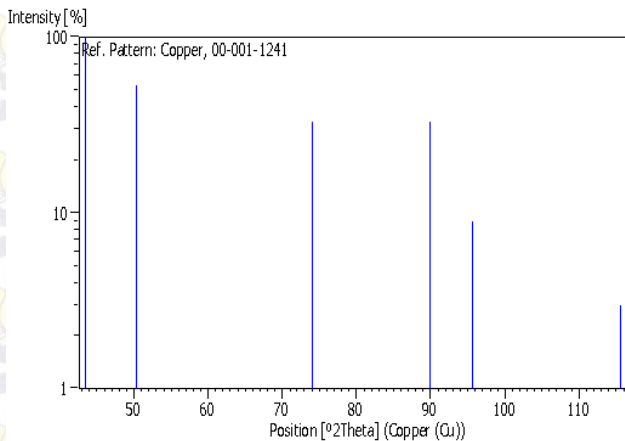
Z: 4.00

RIR: -

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.08000	43.473	100.0
2	2	0	0	1.81000	50.375	53.0
3	2	2	0	1.28000	73.997	33.0
4	3	1	1	1.09000	89.934	33.0
5	2	2	2	1.04000	95.578	9.0
6	4	0	0	0.91000	115.662	3.0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-085-1326

Mineral name: Copper, syn

Compound name: Copper

Empirical formula: Cu

Chemical formula: Cu

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic

Space group: Fm-3m

Space group number: 225

a (Å): 3.6150
b (Å): 3.6150
c (Å): 3.6150
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 47.24

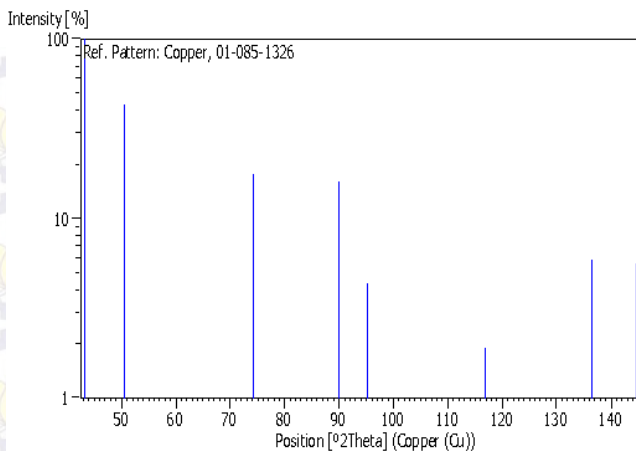
Z: 4.00

RIR: 8.86

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.08710	43.317	100.0
2	2	0	0	1.80750	50.449	43.2
3	2	2	0	1.27810	74.126	17.6
4	3	1	1	1.09000	89.934	16.1
5	2	2	2	1.04360	95.143	4.4
6	4	0	0	0.90380	116.923	1.9
7	3	3	1	0.82930	136.514	5.9
8	4	2	0	0.80830	144.723	5.6

Stick Pattern



Name and formula

Reference code:

01-085-1410

Mineral name:

Iron, syn

Compound name:

Iron

Common name:

α -Fe

Empirical formula:

Fe

Chemical formula:

Fe

Crystallographic parameters

Crystal system:

Cubic

Space group:

Im-3m

Space group number:

229

a (Å):

2.8860

b (Å): 2.8860
c (Å): 2.8860
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 24.04

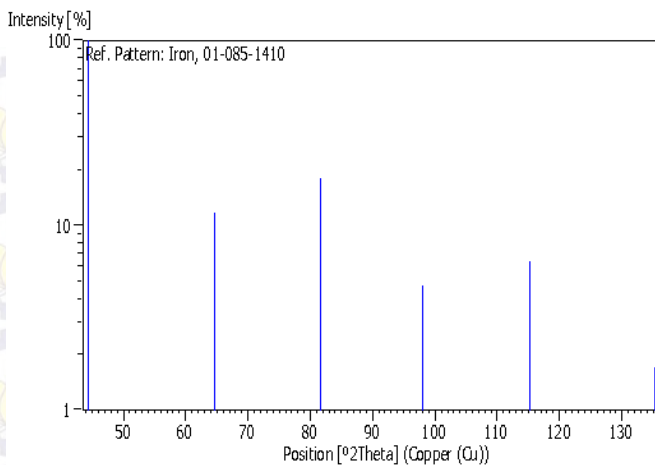
Z: 2.00

RIR: 10.81

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	2.04070	44.354	100.0
2	2	0	0	1.44300	64.528	11.8
3	2	1	1	1.17820	81.657	18.0
4	2	2	0	1.02040	98.033	4.7
5	3	1	0	0.91260	115.145	6.4
6	2	2	2	0.83310	135.222	1.7

Stick Pattern



Name and formula

Reference code:

03-065-4899

Compound name:

Iron

Common name:

α -Fe

Empirical formula:

Fe

Chemical formula:

Fe

Crystallographic parameters

Crystal system:

Cubic

Space group:

Im-3m

Space group number:

229

a (\AA):

2.8670

b (\AA):

2.8670

c (Å): 2.8670
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

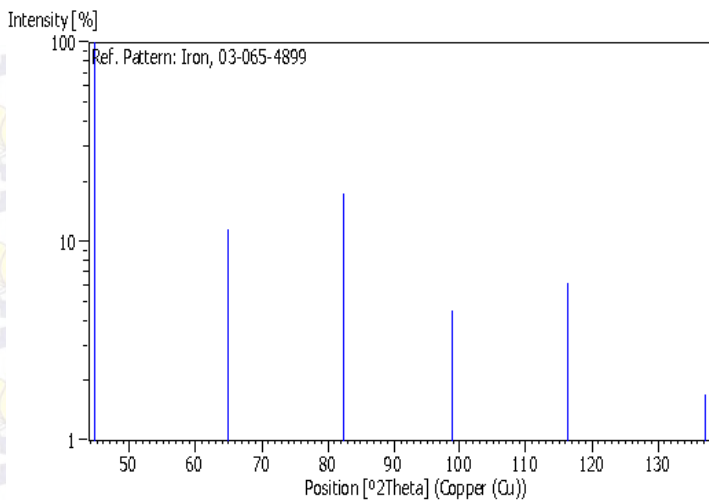
Volume of cell (10^6 pm^3): 23.57
Z: 2.00

RIR: 10.77

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	2.02730	44.663	100.0
2	2	0	0	1.43350	65.008	11.6
3	2	1	1	1.17040	82.318	17.4
4	2	2	0	1.01360	98.922	4.5
5	3	1	0	0.90660	116.349	6.2
6	2	2	2	0.82760	137.108	1.7

Stick Pattern



Name and formula

Reference code:

01-071-7667

Compound name:

Iron

Empirical formula:

Fe_{0.997}

Chemical formula:

(Cu_{.003}Fe_{.997})

Crystallographic parameters

Crystal system:

Cubic

Space group:

Im-3m

Space group number:

229

a (Å):

2.8678

b (Å): 2.8678
c (Å): 2.8678
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 23.59

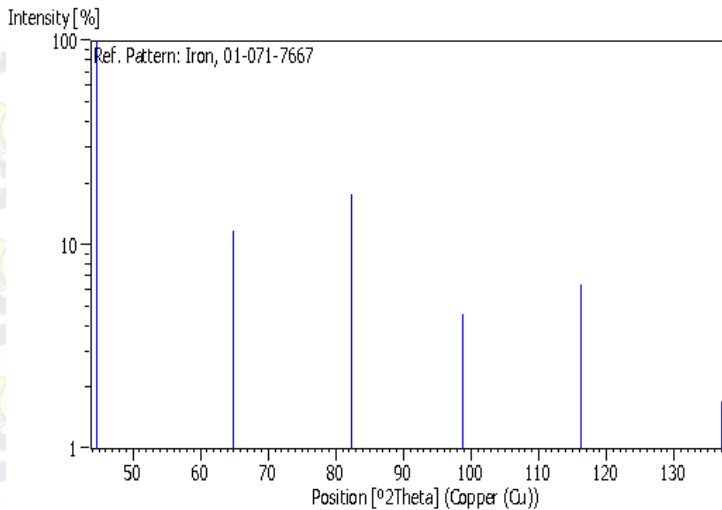
Z: 2.00

RIR: 10.77

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	2.02780	44.651	100.0
2	2	0	0	1.43390	64.987	11.7
3	2	1	1	1.17080	82.284	17.7
4	2	2	0	1.01390	98.882	4.6
5	3	1	0	0.90690	116.288	6.4
6	2	2	2	0.82790	137.003	1.7

Stick Pattern



Name and formula

Reference code:

00-006-0696

Mineral name:

Iron, syn

Compound name:

Iron

Common name:

bainite, ferrite, ledkunitite

Empirical formula:

Fe

Chemical formula:

Fe

Crystallographic parameters

Crystal system:

Cubic

Space group: Im-3m

Space group number: 229

a (Å): 2.8664

b (Å): 2.8664

c (Å): 2.8664

Alpha (°): 90.0000

Beta (°): 90.0000

Gamma (°): 90.0000

Calculated density (g/cm³): 7.87

Volume of cell (10⁶ pm³): 23.55

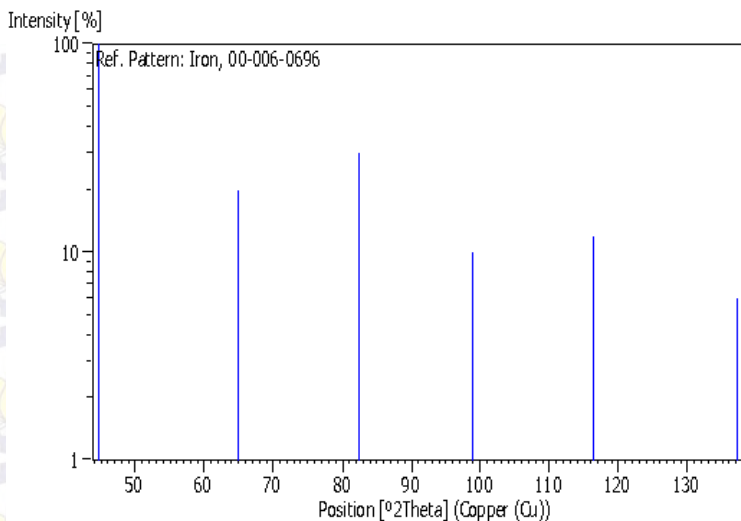
Z: 2.00

RIR: -

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I
<u>[%]</u>						
1	1	1	0	2.02680	44.674	
100.0						
2	2	0	0	1.43320	65.023	
20.0						
3	2	1	1	1.17020	82.335	
30.0						
4	2	2	0	1.01340	98.949	
10.0						
5	3	1	0	0.90640	116.390	
12.0						
6	2	2	2	0.82750	137.144	
6.0						

Stick Pattern



Name and formula

Reference code:

01-071-4407

Compound name:

Iron

Common name:

γ -Fe

Empirical formula:

Fe

Chemical formula:

Fe

Crystallographic parameters

Crystal system:

Cubic

Space group:

Fm-3m

Space group number:

225

a (Å):

3.6544

b (Å):

3.6544

c (Å): 3.6544
 Alpha (°): 90.0000
 Beta (°): 90.0000
 Gamma (°): 90.0000
 Volume of cell (10⁶ pm³): 48.80
 Z: 4.00
 RIR: 7.97

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I
[%]						
1	1	1	1	2.10990	42.826	
100.0						
2	2	0	0	1.82720	49.868	
43.4						
3	2	2	0	1.29200	73.198	
18.3						
4	3	1	1	1.10180	88.714	
17.4						
5	2	2	2	1.05490	93.808	
4.7						
6	4	0	0	0.91360	114.948	
2.1						
7	3	3	1	0.83840	133.495	
6.8						
8	4	2	0	0.81710	141.028	
6.6						

Stick Pattern

Intensity [%]

100

Ref. Pattern: Iron, 01-071-4407

10

1

Position [$^{\circ}$ 2Theta] (Copper (Cu))

50

60

70

80

90

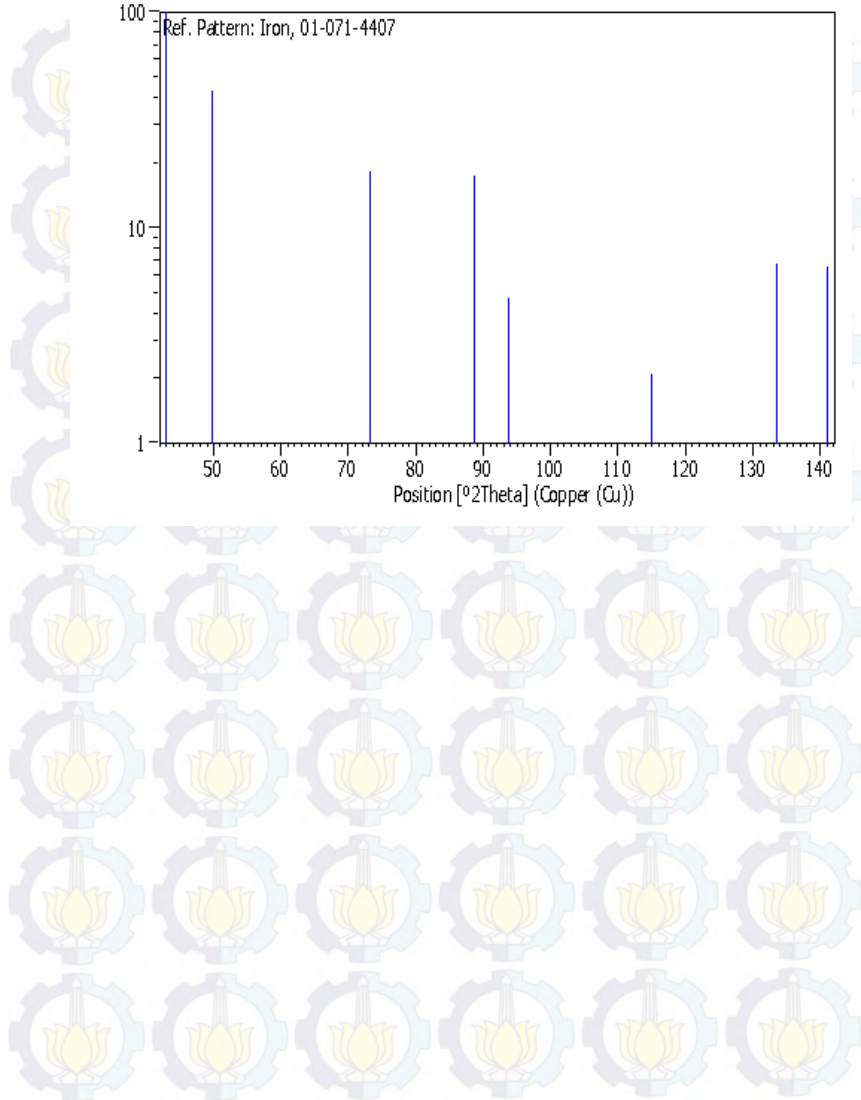
100

110

120

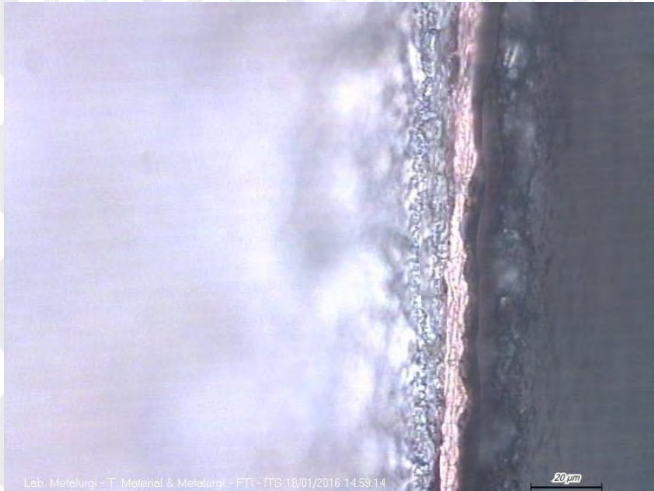
130

140



Lampiran Hasil Foto Lapisan Tembaga Penampang Melintang Tepi AISI 1006

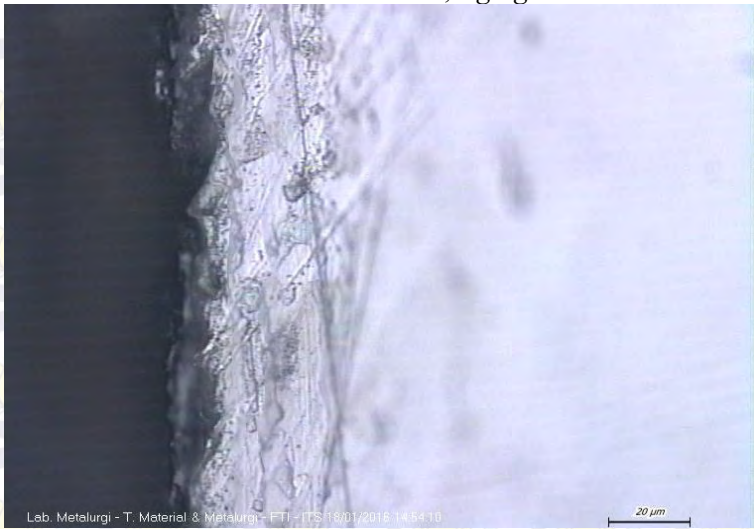
a. *Solution Treatment 30 Menit*



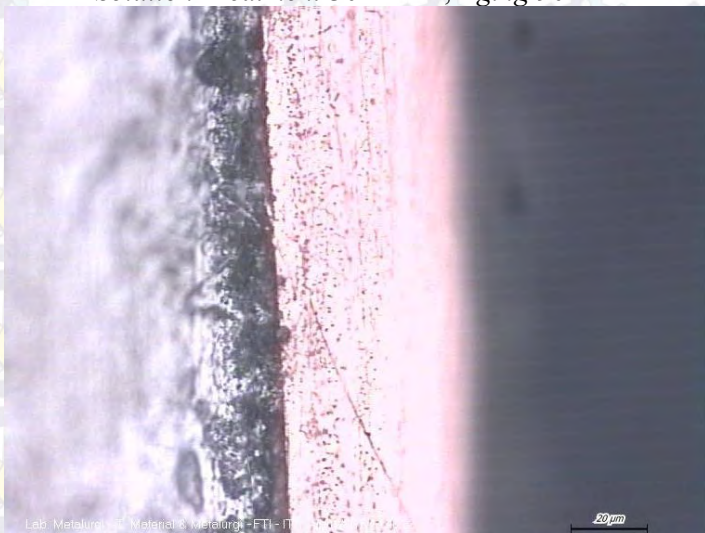
b. *Solution Treatment 30 Menit ; Aging 30 Menit*



c. *Solution Treatment 30 Menit ; Aging 60 Menit*



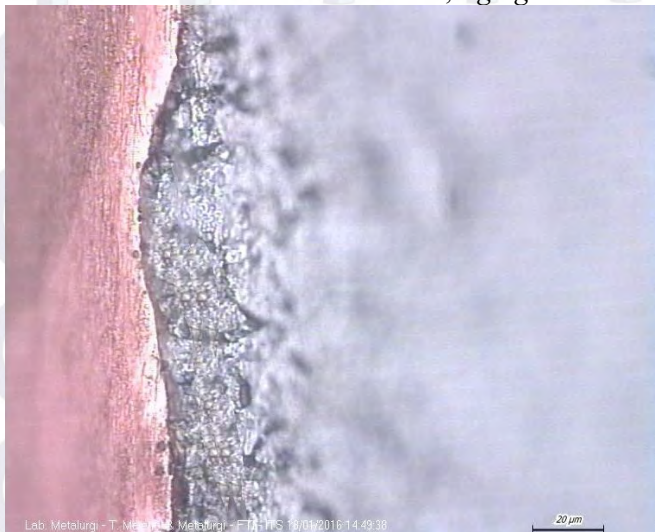
d. *Solution Treatment 30 Menit ; Aging 90 Menit*



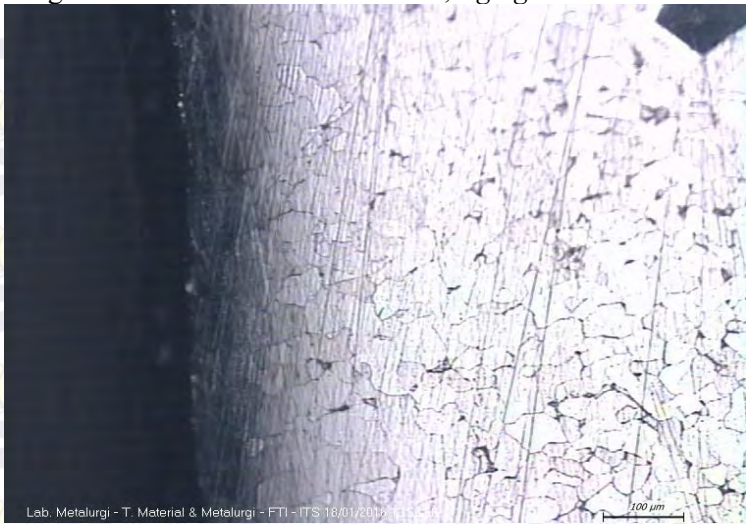
e. *Solution Treatment 60 Menit*



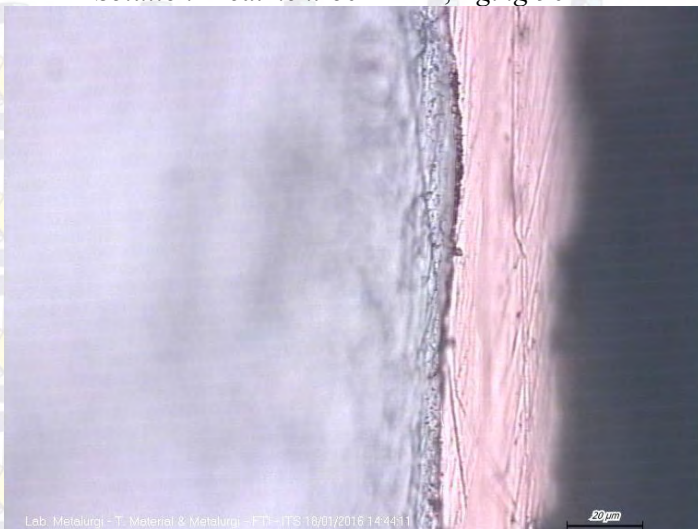
f. *Solution Treatment 60 Menit ; Aging 30 Menit*



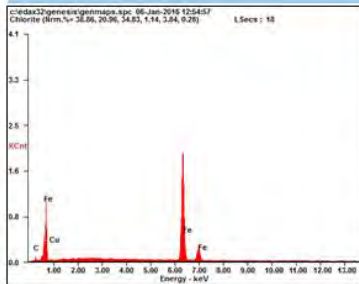
g. *Solution Treatment 60 Menit ; Aging 60 Menit*



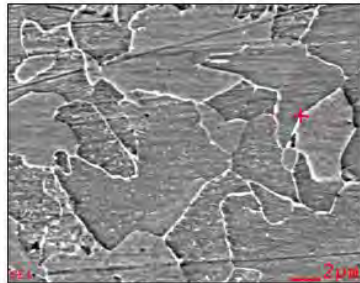
h. *Solution Treatment 60 Menit ; Aging 90 Menit*



Lampiran Hasil Pengujian Spotting SEM/EDX Pada Batas Butir Spesimen *Solution Treatment* 60 Menit dan *Aging* 30 Menit



Element	Wt%	At%
CK	10.72	35.88
CuL	01.49	00.94
FeK	87.79	63.18
Matrix	Correction	ZAF



BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Olivia Rosalia yang dilahirkan di Tuban pada tanggal 17 Juli 1993. Penulis pernah menjalankan pendidikan formal di SDN Kutorejo III Tuban , SMP Negeri 1 Tuban dan SMA Negeri 1 Tuban. Penulis merupakan mahasiswa aktif Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS tahun masuk 2012.

Selama menjalankan pendidikan di kampus ITS Surabaya, penulis berpartisipasi aktif dalam organisasi mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS sebagai Staf Departemen Media dan Informasi Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS dan organisasi mahasiswa Unit Kegiatan Mahasiswa sebagai Wakil Komandan UKM Korps Suka Rela PMI ITS. Selain itu penulis juga aktif dalam aktifitas akademik sebagai asisten laboratorium Praktikum Kimia Analitik. Semasa kuliah penulis juga melakukan kegiatan *On the Job Training* di PT INKA (Persero). Dan kegiatan perkuliahannya diakhiri dengan melakukan penelitian yang dijadikan Tugas Akhir dengan Judul. **“Pengaruh Variasi Waktu Tahan *Solution Treatment* dan *Aging* terhadap Perubahan Mikro Struktur serta Kekerasan *Copperized-AISI1006*”**. Alamat penulis saat ini adalah Jl. Panglima Sudirman , Kutorejo VIII / 524 A Tuban , Jawa Timur. Nomor telepon yang dapat dihubungi adalah 0898 3809 677 atau alamat email olivia177.or@gmail.com.